

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**SISTEMA DE CONTROLE DE UM EQUIPAMENTO DE
FORMULAÇÃO, DOSAGEM E APLICAÇÃO DE
FERTILIZANTES SÓLIDOS A TAXAS VARIÁVEIS**

CLAUDIO KIYOSHI UMEZU

CAMPINAS
OUTUBRO DE 2003

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**SISTEMA DE CONTROLE DE UM EQUIPAMENTO DE
FORMULAÇÃO, DOSAGEM E APLICAÇÃO DE
FERTILIZANTES SÓLIDOS A TAXAS VARIÁVEIS**

Tese submetida à banca examinadora para
obtenção do título de Doutor em Engenharia
Agrícola na Área de Concentração de Máquinas
Agrícolas.

CLAUDIO KIYOSHI UMEZU
Orientador: Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli

CAMPINAS
OUTUBRO DE 2003

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Um2s	<p>Umezu, Claudio Kiyoshi</p> <p>Sistema de controle de um equipamento de formulação, dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis / Claudio Kiyoshi Umezu.-- Campinas, SP: [s.n.], 2003.</p> <p>Orientador: Nelson Luis Cappelli.</p> <p>Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.</p> <p>1. Agricultura e tecnologia. 2. Agricultura - Mecanização. 3. Adubos e fertilizantes - Aplicação. 4. Sistema de controle por realimentação. I. Cappelli, Nelson Luis. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.</p>
------	--

*“Se você conhece o inimigo e conhece a si mesmo,
não precisa temer o resultado de cem batalhas.
Se você se conhece, mas não conhece o inimigo,
para cada vitória ganha, sofrerá também uma derrota.
Se você não conhece nem o inimigo nem a si mesmo,
perderá todas as batalhas...”*

(provérbio japonês)

*Aos meus queridos avós
Yoshio Umezu e Kimi Umezu (in memorian),
Hisashi Ashikaga (in memorian) e Yoshie Ashikaga,
dedico este trabalho.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, e em especial:

- *À Fapesp pelo apoio financeiro a este trabalho;*
- *À Faculdade de Engenharia Agrícola pela oportunidade concedida;*
- *À Empresa Jumil – Justino de Moraes, Irmãos S/A, pelo empréstimo e pelas modificações no chassi de equipamento;*
- *Ao meu orientador e amigo Nelson L. Cappelli pela orientação, oportunidade, incentivo e paciência;*
- *Aos professores da Feagri: Paulo S. G. Magalhães, Inácio M. Dal Fabbro, Antonio J. S. Maciel; pelos preciosos conselhos na elaboração e avaliação deste trabalho;*
- *Aos professores Joaquim M. Maia e Guilherme Bezzon pelas valiosas contribuições na avaliação deste trabalho;*
- *Ao amigo Glauco Guaitolli pelas valiosas contribuições e acima de tudo pela grande amizade;*
- *Aos amigos da Universidade São Francisco, Fábio A. Gaion, Thales C. B. Lima e Paulo E. Silveira, pelas diversas contribuições e pela amizade;*
- *Aos amigos do Laboratório de Instrumentação e Controle: Angel Pontin, Eduardo Nunes, Felipe Rios, Ivan Silvestrin, pela ajuda na realização deste trabalho;*
- *Aos colegas da Feagri: Ana Paula, André, Clóvis, Edgar, Marta e Rosângela, pelo auxílio prestado;*
- *Aos colegas da Feagri: Leandro, José Maria, Luiz Carlos, Francisco e Roberto Carlos, pelo auxílio na execução na montagem e testes do equipamento;*
- *Aos amigos da Pós-Graduação: Aloísio Bianchini, Américo Neto, André Johann, Augusto da Silveira, Edison Russo, Érica da Fonseca, Gilmar da Silva, Keyla Souza, Marcelo Calábria, Natasha Pagnano, Sérgio Piedade, Rodrigo Oliva e Walterley Piccoli pelo companheirismo e amizade;*
- *Ao pessoal de Campinas: Arthimis, Camila, Daniela, Makoto, Maísa, Marcos, Petrus e Silvinha, pela grande amizade;*
- *Ao pessoal de Jundiaí: Eduardo, Paula, Renata e Thaís, pelo incentivo e amizade;*
- *Aos amigos de Santa Cruz: Glauber, Érika, Júnior, Patrícia, Mazante, Pérola, Victor, Adriana, Fábio, Giuliana, Eduardo, Fernanda e Vanessa, pela grande amizade;*
- *À minha família: Luzia, Francisco, Carla, Cassio, Rogério e em especial à Michele, pela compreensão e incentivo para a concretização de mais este sonho;*
- *À Deus, acima de tudo.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE QUADROS	xiii
LISTA DE TABELAS	xiv
RESUMO	1
ABSTRACT	3
1. INTRODUÇÃO	5
2. REVISÃO DE LITERATURA	8
2.1 Agricultura de Precisão	8
2.2 Mapas de Produtividade	16
2.3 Mapas de Fertilidade do Solo	19
2.4 Mapas de Aplicação	20
2.5 Tecnologia de Aplicação Variável	21
2.6 Adubação	26
2.7 Sistemas de Posicionamento Global	28
2.7.1 Correção diferencial	32
2.7.2 Protocolo NMEA de comunicação	38
2.8 Sistemas de Controle	41
2.8.1 Especificações de desempenho	44
2.8.2 Classificação de sistemas de controle	47
2.8.3 Controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID)	49
2.8.4 Sintonia de controladores	52
2.8.5 Metodologia de Ziegler e Nichols	53
3. MATERIAL E MÉTODOS	59
3.1 Material	59
3.2 Métodos	63
3.2.1 Modificações no chassi de semeadora-adubadora convencional	63
3.2.2 Descrição do sistema hidráulico	65
3.2.3 Modificações no sistema mecânico	67

3.2.4	<i>Sistema de aquisição de dados e processamento de sinais</i>	72
3.2.5	<i>Sistema de posicionamento global – GPS</i>	78
3.2.6	<i>Aplicativo para o controle do equipamento</i>	81
3.2.7	<i>Interpretação das sentenças NMEA</i>	82
3.2.8	<i>Sinais de excitação</i>	85
3.2.9	<i>Testes do equipamento</i>	95
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	98
4.1	Integração dos Sistemas	98
4.1.1	<i>Descrição do funcionamento do sistema de controle</i>	99
4.1.2	<i>Sistema de acionamento das válvulas de controle de fluxo</i>	100
4.1.3	<i>Interface de entrada e saída de sinais</i>	102
4.1.4	<i>Sistema de acionamento da bomba hidráulica</i>	103
4.1.5	<i>Sistema para controle da rotação da bomba</i>	106
4.2	Desenvolvimento de Aplicativos Computacionais	107
4.2.1	<i>Controle geral do equipamento</i>	107
4.2.2	<i>Implementação dos controladores de rotação</i>	110
4.2.3	<i>Leitura da posição geo-referenciada e da velocidade de deslocamento</i>	112
4.2.4	<i>Aplicativo para realização dos testes iniciais</i>	115
4.3	Avaliação Inicial do Equipamento	119
4.3.1	<i>Testes estáticos para o eixo 1</i>	119
4.3.2	<i>Testes estáticos para o eixo 2</i>	121
4.3.3	<i>Testes estáticos para o eixo 3</i>	123
4.3.4	<i>Comparação dos testes estáticos para os três eixos</i>	125
4.4	Controlador de Rotação em Malha Aberta	126
4.4.1	<i>Excitação do tipo degrau</i>	127
4.4.2	<i>Excitação do tipo degraus múltiplos</i>	128
4.4.3	<i>Excitação do tipo rampa rápida</i>	130
4.4.4	<i>Excitação do tipo rampa lenta</i>	133
4.4.5	<i>Excitação do tipo rampas múltiplas</i>	134
4.4.6	<i>Avaliação da interdependência da rotação dos motores</i>	136
4.4.7	<i>Comportamento do sistema em função do aquecimento do óleo</i>	137
4.4.8	<i>Flutuação na rotação da bomba</i>	140
4.5	Controlador de Rotação em Malha Fechada	143
4.5.1	<i>Aplicação da metodologia de Ziegler-Nichols</i>	144
4.5.2	<i>Implementação do Controlador P, segundo Ziegler-Nichols</i>	146
4.5.3	<i>Implementação do Controlador PI, segundo Ziegler-Nichols</i>	148
4.5.4	<i>Implementação do Controlador PID, segundo Ziegler-Nichols</i>	149
4.5.5	<i>Ajuste fino do Controlador PID</i>	151
4.6	Testes em Malha Fechada	152

4.6.1	<i>Excitação do tipo degrau</i>	152
4.6.2	<i>Excitação do tipo degraus múltiplos</i>	154
4.6.3	<i>Excitação do tipo rampa rápida</i>	155
4.6.4	<i>Excitação do tipo rampa lenta</i>	156
4.6.5	<i>Excitação do tipo rampas múltiplas</i>	157
4.6.6	<i>Comportamento do sistema em função do aquecimento do óleo</i>	158
4.6.7	<i>Flutuação na rotação da bomba</i>	160
5.	CONCLUSÕES	165
6.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	167
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	169

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Etapas da Agricultura de Precisão (adaptada de STAFFORD, 1996a)</i>	12
<i>Figura 2 – Mapas de produtividade da colheita (adaptada de SUDDUTH, 1999)</i>	17
<i>Figura 3 – Mapas de fertilidade solo (adaptada de SUDDUTH, 1999)</i>	20
<i>Figura 4 – Diagrama de blocos componentes de um equipamento de aplicação variável</i>	24
<i>Figura 5 – Constelação de satélites do GPS (adaptada de DANNA, 2000)</i>	29
<i>Figura 6 – Funcionamento do GPS (adaptada de MORGAN e ESS, 1997)</i>	31
<i>Figura 7 – Conceito da correção diferencial em tempo real (adaptada de MORGAN e ESS, 1997)</i>	36
<i>Figura 8 – Estrutura proposta de um sistema integrado de controle (adaptada de SCARLETT, 2001)</i>	44
<i>Figura 9 – Curva de resposta a uma entrada do tipo degrau unitário (extraída de Ogata, 2003)</i>	45
<i>Figura 10 – Sistema de controle em malha aberta</i>	47
<i>Figura 11 – Sistema de controle em malha fechada</i>	48
<i>Figura 12 – Curva de resposta do tipo “S” (extraída de OGATA, 2003)</i>	55
<i>Figura 13 – Saída com oscilação sustentada (extraída de OGATA, 2003)</i>	57
<i>Figura 14 – Equipamento para formulação, dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis</i>	64
<i>Figura 15 – Diagrama esquemático do sistema hidráulico do equipamento</i>	65
<i>Figura 16 – Diagrama esquemático do sistema de acionamento dos dosadores</i>	66
<i>Figura 17 – Montagem das válvulas proporcionais no equipamento</i>	67
<i>Figura 18 – Eixos de acionamento dos dosadores</i>	68
<i>Figura 19 – Acoplamento dos motores hidráulicos com os eixos de acionamento dos dosadores</i>	69
<i>Figura 20 – Acoplamento entre os eixos de acionamento e os pinhões dos dosadores</i>	70
<i>Figura 21 – Depósito de fertilizante subdividido em três partes, mostrando ao fundo os dosadores helicoidais</i>	71
<i>Figura 22 – Dutos de captação e junção dos produtos dosados em uma linha de aplicação</i>	72
<i>Figura 23 – Diagrama de blocos da ligação do sistema de aquisição de dados e processamento de sinais</i>	73
<i>Figura 24 – Computador portátil e sistema de aquisição e processamento de sinais MGCplus</i>	74
<i>Figura 25 – Instalação do sensor de rotação</i>	75
<i>Figura 26 – Esquema de ligação do sensor de rotação do eixo de acionamento</i>	76
<i>Figura 27 – Esquema de ligação dos equipamentos da estação base de correção diferencial, em tempo real, para GPS</i>	79
<i>Figura 28 – Local de instalação da estação de correção diferencial, em tempo real, para GPS</i>	80
<i>Figura 29 – Esquema do GPS móvel, com correção diferencial em tempo real</i>	81
<i>Figura 30 – Excitação do tipo degrau, expresso em valores de tensão de comando</i>	86
<i>Figura 31 – Excitação do tipo degrau, expresso em valores de rotação</i>	87
<i>Figura 32 – Excitação do tipo degraus múltiplos, expresso em valores de tensão de comando</i>	88

<i>Figura 33 – Excitação do tipo degraus múltiplos, expresso em valores de rotação</i>	89
<i>Figura 34 – Excitação do tipo rampa rápida, expresso em valores de tensão de comando</i>	90
<i>Figura 35 – Excitação do tipo rampa rápida, expresso em valores de rotação</i>	91
<i>Figura 36 – Excitação do tipo rampa lenta, expresso em valores de tensão de comando</i>	92
<i>Figura 37 – Excitação do tipo rampa lenta, expresso em valores de rotação</i>	93
<i>Figura 38 – Excitação do tipo rampas múltiplas, expresso em valores de tensão de comando</i>	94
<i>Figura 39 – Excitação do tipo rampas múltiplas, expresso em valores de rotação</i>	95
<i>Figura 40 – Integração dos componentes eletrônicos</i>	99
<i>Figura 41 – Amplificador PWM</i>	101
<i>Figura 42 – Esquema de ligação dos sensores de rotação a um dos cartões DAQCard 1200</i>	102
<i>Figura 43 – Esquema de ligação dos amplificadores PWM aos cartões de aquisição de dados e controle DAQCard 1200</i>	103
<i>Figura 44 – Esquema de ligação elétrica do motor elétrico para acionamento da bomba hidráulica</i>	104
<i>Figura 45 – Bancada móvel para acionamento do motor elétrico, contendo o autotransformador e o conversor de frequência</i>	105
<i>Figura 46 – Esquema de ligação do cartão DAQ Card 1200 com o conversor de frequência</i>	106
<i>Figura 47 – Fluxograma simplificado do aplicativo computacional para o controle do equipamento</i>	109
<i>Figura 48 – Controlador para a rotação dos motores hidráulicos</i>	110
<i>Figura 49 – Diagrama funcional do controlador de rotação do motor hidráulico, implementado em LabVIEW</i>	111
<i>Figura 50 – Tela de interface com o usuário do controlador de rotação do motor hidráulico, implementado com o LabVIEW</i>	112
<i>Figura 51 – Fluxograma do aplicativo para leitura da posição e velocidade de deslocamento</i>	113
<i>Figura 52 – Tela de visualização do aplicativo para leitura da posição geo-referenciada e velocidade de deslocamento, a partir do GPS</i>	114
<i>Figura 53 – Diagrama funcional do aplicativo desenvolvido para a leitura da posição e velocidade de deslocamento a partir do GPS.</i>	114
<i>Figura 54 – Tela do aplicativo para a realização dos testes iniciais do equipamento</i>	115
<i>Figura 55 – Diagrama funcional do aplicativo desenvolvido para a realização dos testes iniciais</i>	116
<i>Figura 56 – Tela do programa para teste e avaliação do equipamento</i>	117
<i>Figura 57 – Diagrama funcional do aplicativo desenvolvido para os testes e avaliação do equipamento</i>	118
<i>Figura 58 – Comportamento da rotação do eixo 1 em função da tensão de comando</i>	121
<i>Figura 59 – Comportamento da rotação do eixo 2 em função da tensão de comando</i>	123
<i>Figura 60 – Comportamento da rotação do eixo 3 em função da tensão de comando</i>	125
<i>Figura 61 – Comparativo entre o comportamento da rotação dos três eixos em função da tensão de comando</i>	126
<i>Figura 62 – Rotação obtida no eixo para um sinal de excitação do tipo degrau</i>	127
<i>Figura 63 – Rotação obtida no eixo para um sinal de excitação do tipo degrau, normalizado para a rotação</i>	128
<i>Figura 64 – Rotação obtida no eixo para um sinal de excitação do tipo degraus múltiplos</i>	129

<i>Figura 65 – Rotação obtida no eixo para um sinal de excitação do tipo degraus múltiplos, normalizado para a rotação</i>	130
<i>Figura 66 – Rotação obtida no eixo para um sinal de excitação do tipo rampa rápida</i>	131
<i>Figura 67 – Rotação obtida no eixo para um sinal de excitação do tipo rampa rápida, normalizado para a rotação</i>	132
<i>Figura 68 – Rotação obtida no eixo para um sinal de excitação do tipo rampa lenta</i>	133
<i>Figura 69 – Rotação obtida no eixo para um sinal de excitação do tipo rampa lenta, normalizado para a rotação</i>	134
<i>Figura 70 – Rotação obtida no eixo para um sinal de excitação do tipo rampas múltiplas</i>	135
<i>Figura 71 – Rotação obtida no eixo para um sinal de excitação do tipo rampas múltiplas, normalizado para a rotação</i>	136
<i>Figura 72 – Rotação desejada do eixo 1 e rotação obtida do eixo 2</i>	137
<i>Figura 73 – Comportamento da rotação do motor com o aquecimento do óleo</i>	138
<i>Figura 74 – Rotação desejada e rotação obtida à diferentes temperaturas</i>	139
<i>Figura 75 – Curva de flutuação na rotação da bomba hidráulica</i>	140
<i>Figura 76 – Rotação desejada e rotação obtida em função de uma flutuação na rotação da bomba, para a rotação desejada de 40 min⁻¹</i>	141
<i>Figura 77 – Rotação desejada e rotação obtida em função de uma flutuação na rotação da bomba, para a rotação desejada de 75 min⁻¹</i>	142
<i>Figura 78 – Rotação desejada e rotação obtida em função de uma flutuação na rotação da bomba, para a rotação desejada de 95 min⁻¹</i>	143
<i>Figura 79 – Resultado do teste para determinação dos parâmetros do controlador segundo a metodologia de Ziegler-Nichols</i>	145
<i>Figura 80 – Comportamento da rotação do motor, para um sinal de excitação do tipo degraus múltiplos, com um controlador Proporcional (P)</i>	147
<i>Figura 81 – Comportamento da rotação do motor, para um sinal de excitação do tipo degraus múltiplos, com um controlador Proporcional + Integral (PI)</i>	148
<i>Figura 82 – Comportamento da rotação do motor, para um sinal de excitação do tipo degraus múltiplos, com um controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID)</i>	150
<i>Figura 83 – Comportamento da rotação do motor, para um sinal de excitação do tipo degrau, com o controlador PID submetido a um ajuste fino</i>	153
<i>Figura 84 – Comportamento da rotação do motor, para um sinal de excitação do tipo degraus múltiplos, com o controlador PID submetido a um ajuste fino</i>	154
<i>Figura 85 – Comportamento da rotação do motor, para um sinal de excitação do tipo rampa rápida, com o controlador PID submetido a um ajuste fino</i>	155
<i>Figura 86 – Comportamento da rotação do motor, para um sinal de excitação tipo rampa lenta, com o controlador PID submetido a um ajuste fino</i>	156
<i>Figura 87 – Comportamento da rotação do motor, para um sinal de excitação tipo rampas múltiplas, com o controlador PID submetido a um ajuste fino</i>	157
<i>Figura 88 – Rotação desejada e rotação obtida à diferentes temperaturas, para um sinal de excitação tipo degraus múltiplos, com o controlador PID submetido a um ajuste fino</i>	159

<i>Figura 89 – Rotação desejada e rotação obtida em função de uma flutuação na rotação da bomba, para a rotação desejada de 20 min⁻¹</i>	161
<i>Figura 90 – Rotação desejada e rotação obtida em função de uma flutuação na rotação da bomba, para a rotação desejada de 40 min⁻¹</i>	162
<i>Figura 91 – Rotação desejada e rotação obtida em função de uma flutuação na rotação da bomba, para a rotação desejada de 60 min⁻¹</i>	163
<i>Figura 92 – Rotação desejada e rotação obtida em função de uma flutuação na rotação da bomba, para a rotação desejada de 80 min⁻¹</i>	164

LISTA DE QUADROS

<i>Quadro 1 – Campos de uma sentença NMEA 0183</i>	39
<i>Quadro 2 – Sentenças NMEA comumente utilizadas</i>	41
<i>Quadro 3 – Resumo das ações de um controlador PID</i>	51
<i>Quadro 4 – Parâmetros do controlador PID segundo a metodologia de Ziegler-Nichols (primeiro método)</i>	56
<i>Quadro 5 – Parâmetros do controlador PID segundo a metodologia de Ziegler-Nichols (segundo método)</i>	57
<i>Quadro 6 – Estrutura da sentença GLL</i>	83
<i>Quadro 7 – Descrição dos campos da sentença GLL</i>	83
<i>Quadro 8 – Estrutura da sentença VTG</i>	84
<i>Quadro 9 – Descrição dos campos da sentença VTG</i>	84
<i>Quadro 10 – Faixa de variação e incremento dos parâmetros do controlador PID</i>	111

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Resultados dos testes estáticos avaliando a rotação do eixo 1 em função da tensão de comando</i>	120
<i>Tabela 2 – Resultados dos testes estáticos avaliando a rotação do eixo 2 em função da tensão de comando</i>	122
<i>Tabela 3 – Resultados dos testes estáticos avaliando a rotação do eixo 3 em função da tensão de comando</i>	124
<i>Tabela 4 – Parâmetros do controlador PID segundo a metodologia de Ziegler-Nichols</i>	145
<i>Tabela 5 – Parâmetros do controlador PID segundo a metodologia de Ziegler-Nichols, em valores de ganho</i>	146

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo principal, desenvolver o sistema de controle de um equipamento de formulação, dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos no sulco, a taxas variáveis.

Foi utilizado um receptor GPS com correção diferencial, em tempo real, para fornecer informações geo-referenciadas da posição do equipamento. Os dispositivos dosadores foram acionados por motores hidráulicos com velocidades angulares controladas através de servo-válvulas de vazão, compensadas à pressão.

Optou-se por uma implementação do controlador utilizando-se um sistema computacional com um aplicativo apropriado. O uso de um controlador baseado em uma solução computacional traz vantagens: possibilita uma grande flexibilidade na escolha de sua estrutura, facilidade no ajuste, interface amigável com o usuário, entre outras, quando comparado com um controlador implementado com componentes eletrônicos.

Foram desenvolvidos, com a utilização de um aplicativo computacional, controladores de rotação em malha fechada, para se assegurar a manutenção de forma precisa das rotações desejadas para os dosadores. Foi desenvolvido também, um aplicativo para a leitura e interpretação de informações de posicionamento e velocidade de deslocamento do equipamento a partir do sinal gerado por um sistema de posicionamento global.

O sistema de controle geral do equipamento tem a função de interpretar um mapa de aplicação e comandar os dosadores de acordo com a posição geo-referenciada e com a velocidade de deslocamento do equipamento.

O equipamento foi testado em laboratório simulando-se situações reais de dosagens e formulações de fertilizantes. Foram avaliadas a faixa de variação e a precisão da rotação em cada um dos motores, a rapidez para a obtenção da rotação desejada e ainda, a potência disponível para acionamento dos dosadores.

Sinais padrão de excitação do tipo degrau, rampa e uma combinação destes, foram utilizados para avaliação do comportamento da rotação dos dosadores e, conseqüentemente, da taxa de aplicação ao longo do tempo. Características de desempenho como: tempo de subida, tempo de atraso, sobresinal máximo, erro em regime estacionário, foram criteriosamente avaliadas e ajustadas.

Os testes realizados mostraram que o sistema de controle implementado foi adequado para utilização no equipamento. Os controladores se mostraram bastante eficazes e versáteis. A metodologia de ajuste se mostrou válida para uma estimativa inicial dos parâmetros dos controladores, obtendo-se uma expressiva melhora nos índices de desempenho analisados. Com os controladores eliminou-se os problemas de histerese e dos problemas decorrentes do aquecimento do óleo hidráulico.

O equipamento desenvolvido tem capacidade para aplicação de fertilizantes sólidos no sulco, a taxas variáveis, com quatro linhas de aplicação, operando com até três tipos de fertilizantes, permitindo a obtenção de formulações distintas das originais com a combinação destes elementos.

PALAVRAS-CHAVE: agricultura de precisão, aplicação localizada, sistemas de controle.

ABSTRACT

The main objective of this research was, to design a control system for an equipment for formulation, dosing and application of solid fertilizers in the furrow, at variable rates.

A GPS receiver, with differential correction, was used, in real time, to supply the equipment geographic position. The dosing devices were driven by hydraulic motors with angular speeds controlled through pressure compensated flow servo valves.

A computational control system, with appropriated software was adopted as a solution. A controller based on a computational solution has several advantages when compared with a controller implemented with electronic components such as among other: it is more flexible, easiness in the adjustment and has a friendly interface.

Closed mesh rotational controllers were designed, with a computational application, to guarantee the desired angular speed of the dosing shaft. An application for reading and interpreting positioning information and speed of displacement of the equipment from the sign generated by the global positioning system was also built.

The global control system of the equipment has the function of interpret the application map and to command the dosing devices in accord with the geographic position and velocity of the equipment.

The equipment was tested in laboratory, simulating real situations of fertilizers dosing and formulations. The variation gap and the precision of the shaft angular velocity were appraised for each motor, the equipment response and the power required for the dosing devices were also determined.

Standard excitement signal, unit step, ramp and combination of those, were used for behavior evaluation of the equipment, and consequently, of the application rate along the time. Dynamic characteristics as: time of ascent, delay, maximum overshooting, error in steady state, were appraised and adjusted with criteria.

The accomplished tests showed that the implemented control system was suitable for use in the equipment. The controllers were quite effective and versatile. The methodology used for adjustment was valid for an initial estimation of the controller's parameters. Expressive improvement on the analyzed performance indexes was obtained. With the controllers the hystereses problems was eliminated and the consequent hydraulic oil heating problem.

The equipment designed has the capacity to apply solid fertilizers in the furrow, at variables rates, with four application lines, operating up to three types of fertilizers, allowing the obtainment of different formulations with the combination of these elements.

KEY-WORDS: precision farming, site specific, control systems.

1. INTRODUÇÃO

O desempenho da agricultura brasileira, em termos de produção, tem sido crescente nos últimos anos. Ano a ano têm sido obtidas safras extraordinárias.

De acordo com o IBGE¹ (2003), a produção nacional de cereais, leguminosas e oleaginosas (caroço de algodão, amendoim, arroz, feijão, mamona, milho, soja, aveia, centeio, cevada, girassol, sorgo, trigo e triticale), deverá alcançar 120,865 milhões de toneladas, 24,38% superior à de 2002 (97,174 milhões de toneladas), segundo o Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (LSPA), realizado com informações coletadas em julho de 2003 e divulgado pelo IBGE. A estimativa é a sétima realizada em 2003 e supera a anterior, de junho, que previa uma safra de 119,729 milhões de toneladas.

Deve-se ressaltar que o fenômeno não é localizado, já que em todas as grandes regiões brasileiras prevê-se crescimento da produção agrícola.

No entanto, a evolução da produção e da área plantada no Brasil em doze anos, mostra que enquanto a área cresceu 12,7 % (1 % ao ano), a produção aumentou 99 % (5,9 % ao ano). O Ministro da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Roberto Rodrigues, observou que esse resultado mostra a profissionalização do produtor nacional que, nos últimos anos, vem utilizando maior nível tecnológico, como sementes melhoradas, fertilizantes, análise e correção do solo, plantio direto, máquinas e implementos agrícolas mais modernos.

Sem dúvida, nota-se que o aumento da quantidade produzida deve-se em grande parte ao aumento da produtividade média da área cultivada. Essa produtividade crescente só é obtida por meio do uso, cada vez maior, de tecnologias modernas nas mais diversas áreas envolvidas com o processo produtivo. Dentre elas, as tecnologias relativas à agricultura de precisão se destacam com um grande potencial de desenvolvimento.

¹ IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

Um dos indicativos da exploração intensiva das áreas de cultivo é a quantidade de fertilizante utilizada para repor os nutrientes das plantas no solo.

De acordo com a ANDA – Associação Nacional para a Difusão de Adubos (2003), as vendas de fertilizantes de janeiro a julho de 2003 atingiram 9,847 milhões de toneladas, ou 6,1 % a mais do que em igual período do ano passado (9,285 milhões de toneladas) e o melhor desempenho histórico. As vendas em julho somaram 2,272 milhões de toneladas e ficaram 1,6% acima dos 2,237 milhões de toneladas de julho de 2002. Os dados são fornecidos pela entidade que reúne 125 empresas do setor e denotam o crescente aumento da utilização do insumo, principalmente quando comparado com o aumento da área cultivada.

Na prática da agricultura tradicional, a reposição dos nutrientes no solo contribui com uma das maiores parcelas do custo de produção. Nesta prática, a quantidade e formulação do adubo são definidas com base na necessidade média da área a ser cultivada e na expectativa da quantidade a ser produzida. Já numa visão mais avançada, a quantidade do fertilizante e sua formulação são definidas com base nas necessidades localizadas de cada ponto da área produtiva. Neste sentido, são necessárias tecnologias modernas relacionadas à aplicação localizada de insumos, notadamente, máquinas e equipamentos com capacidade de formular, dosar e aplicar os fertilizantes de forma localizada.

No Brasil, na implantação das principais culturas de grãos, tem-se como prática comum a aplicação do fertilizante no sulco simultânea com a semeadura, sendo utilizados, portanto, os implementos agrícolas denominados semeadoras-adubadoras.

Ocorre, porém, que as semeadoras-adubadoras existentes comercialmente no mercado nacional não possuem a capacidade necessária para a realização da formulação e aplicação localizada a taxas variáveis, sendo importante, desta forma, o desenvolvimento deste tipo de equipamento.

Com a finalidade de disponibilizar um equipamento para formulação, dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos, no sulco e a taxas variáveis, OLIVA et al. (2001) apresentou um protótipo desenvolvido a partir de uma semeadora-adubadora comercial convencional. Neste equipamento, cada aplicador regula a dosagem de seu componente, sendo que todos os aplicadores podem operar simultaneamente. Deste modo, a variação na proporção entre os

diferentes componentes possibilita a variação na formulação do fertilizante aplicado, bem como a somatória das vazões de todos os componentes resulta na taxa de aplicação total.

O protótipo era capaz de aplicar, a taxas variáveis, três tipos distintos de fertilizantes, no entanto, não possuía um sistema de controle eletrônico para a formulação e aplicação localizada do fertilizante.

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema de controle de um equipamento para, formulação, dosagem e aplicação localizada de fertilizantes sólidos a taxas variáveis.

Inicialmente realizou-se um estudo detalhado sobre o funcionamento do sistema mecânico e hidráulico do equipamento, visando o projeto e a construção de um sistema de controle eletrônico. Foram então definidos os objetivos do sistema de controle, limites operacionais do equipamento e procedimentos para a correta operação do sistema como um todo. Nessa etapa também foram estabelecidas a forma de implementação do sistema de controle do equipamento e sua plataforma computacional. Finalmente foram definidas as metodologias de teste e avaliação do equipamento.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Agricultura de Precisão

O fenômeno da globalização da economia tem obrigado os diversos setores produtivos nacionais a buscar tecnologia de ponta para poderem enfrentar os seus grandes concorrentes no mercado internacional. A agricultura brasileira não foge à regra, e somente poderá enfrentar concorrentes como Estados Unidos, Inglaterra, França, Canadá, Austrália e outros, se dispuser de tecnologias avançadas que possibilitem aos seus produtos, serem competitivos em preço e qualidade.

O termo “Agricultura de Precisão²” é utilizado para descrever o uso de diversas tecnologias avançadas, buscando a redução dos custos de produção e preocupando-se com a preservação do meio ambiente.

MAOHUA (2001) ressalta a importância socioeconômica do investimento em novas tecnologias, entre elas a agricultura de precisão, para o desenvolvimento tecnológico dos países em desenvolvimento, o incremento da produção agrícola e o fomento ao desenvolvimento de novas tecnologias. A “era da informação” e a facilidade de aquisição de informação tecnológica, trouxe uma transformação neste quadro. Contudo, o que ocorre nestes países não é um desenvolvimento tecnológico, mas sim uma adaptação de tecnologias já aplicadas em países desenvolvidos, o que coloca estes países um passo atrás, nesta corrida tecnológica.

Segundo FRAISSE e FAORO (1998), a agricultura de precisão é uma tecnologia de informação que possibilita o gerenciamento da atividade agrícola, levando em consideração a

² Na língua inglesa, o conceito de agricultura de precisão é normalmente relacionado com as expressões: “*precision farm*”, “*site specific*” e “*precision agriculture*”.

variabilidade espacial e temporal das condições do solo e da cultura, permitindo desta forma a otimização da utilização do uso dos insumos agrícolas.

WHELAN et al. (1997) afirmam que os sistemas agrícolas têm se beneficiado pelo desenvolvimento tecnológico obtido por outros segmentos industriais. Tal desenvolvimento possibilitou a mecanização e automatização da produção. A era da informação potencializou este intercâmbio tornando cada vez mais viável o desenvolvimento da agricultura de precisão.

A prática da agricultura de precisão é na verdade anterior à agricultura hoje praticada. FRAISSE e FAORO (1998) afirmam que mesmo antes da revolução industrial e do processo de mecanização da agricultura, os agricultores já eram capazes de reconhecer a variabilidade espacial de certas características físico-químicas e biológicas das áreas cultivadas.

Na agricultura hoje praticada, a busca pelo aumento da capacidade de trabalho do homem e da produtividade da lavoura levou à mecanização em larga escala. A solução hoje adotada é a de focar grandes áreas produtivas e considerá-las como homogêneas. Esse raciocínio leva ao conceito da necessidade média para a aplicação de insumos (água, fertilizantes, defensivos, etc.) e faz com que, por exemplo, a mesma formulação e/ou dosagem do fertilizante seja utilizada para toda área. Assim, são atendidas apenas as necessidades médias, não considerando desta forma, as necessidades específicas de cada parte do campo. O mesmo acontece com os demais insumos, tendo como consequência excessos onde são menos necessários e falta onde são mais necessários. O resultado final é uma lavoura com produtividade não uniforme e custo de produção onerado, além da possibilidade de danos ambientais significativos, como, por exemplo, a contaminação dos recursos hídricos existentes.

ZHANG et al. (2002) destacam que a tecnologia da agricultura de precisão causa um grande impacto em duas áreas: aumento dos lucros e benefícios ao meio ambiente. Segundo os autores, a agricultura de precisão vem aumentando a identificação de problemas de produção agrícola, aumentando a produtividade, reduzindo custos e reduzindo danos à cultura.

Vários autores reconhecem que a aplicação uniforme de insumos em campos aráveis não é eficiente em termos de custo, e, além disso, tem um indesejável impacto ambiental. Para FRAISSE e FAORO (1998), a tecnologia da agricultura de precisão traz a promessa de

aumento da produtividade e redução do impacto ambiental, fato esse que atrairia a atenção de todos, pois conciliaria objetivos antes considerados antagônicos, já que o aumento da produtividade sempre esteve associado ao uso intensivo de insumos e conseqüente aumento do risco ambiental.

AUERNHAMMER (2001), ressalta que com a aplicação de fertilizantes, associada à necessidade de um local específico, pode-se obter uma alta produtividade, com economia de aplicação de fertilizantes, diminuindo assim a poluição ao meio ambiente.

Em oposição à agricultura tradicional, a agricultura de precisão enfoca a variabilidade espacial e temporal dos requerimentos de aplicação de insumos durante todo o processo produtivo. Para o sucesso de tal tecnologia é necessária a utilização de tecnologias avançadas e a interpretação da maior quantidade de informações possíveis sobre o processo.

Sobre esse assunto, STAFFORD et al. (1996) colocam que a maioria dos campos agrícolas tem uma variabilidade espacial inerente em fatores como tipo de solo, disponibilidade de nutrientes, condição de drenagem, declividade, entre outros. Culturas aráveis possuem esta variabilidade em diferentes níveis, mas o resultado final obtido na colheita, é uma produção que varia em qualidade e quantidade ao longo do campo. Geralmente, a metodologia utilizada pelos agricultores é tratar os campos como uma área uniforme na aplicação de insumos tais como fertilizantes e agroquímicos. O gerenciamento da produção é usualmente baseado no conhecimento de culturas anteriores e na sua produtividade média.

Uma das grandes dificuldades conceituais da agricultura de precisão é a variação dos atributos das áreas no decorrer do tempo, pois tais atributos mudam suas propriedades com o crescimento da cultura e com operações realizadas no campo. Um exemplo deste tipo de variabilidade é a disponibilidade de nitrogênio para as plantas.

Sabe-se que o aumento da eficiência de um sistema está diretamente relacionado com a tecnologia utilizada e que, por sua vez, seu bom aproveitamento depende da quantidade de informação disponível para gerenciar a aplicação de cada um dos recursos existentes. Dessa forma, pode-se esperar que a eficiência de um processo altamente organizado tenda a

aumentar com o decorrer do tempo e à medida que mais informações sobre o mesmo sejam agregadas.

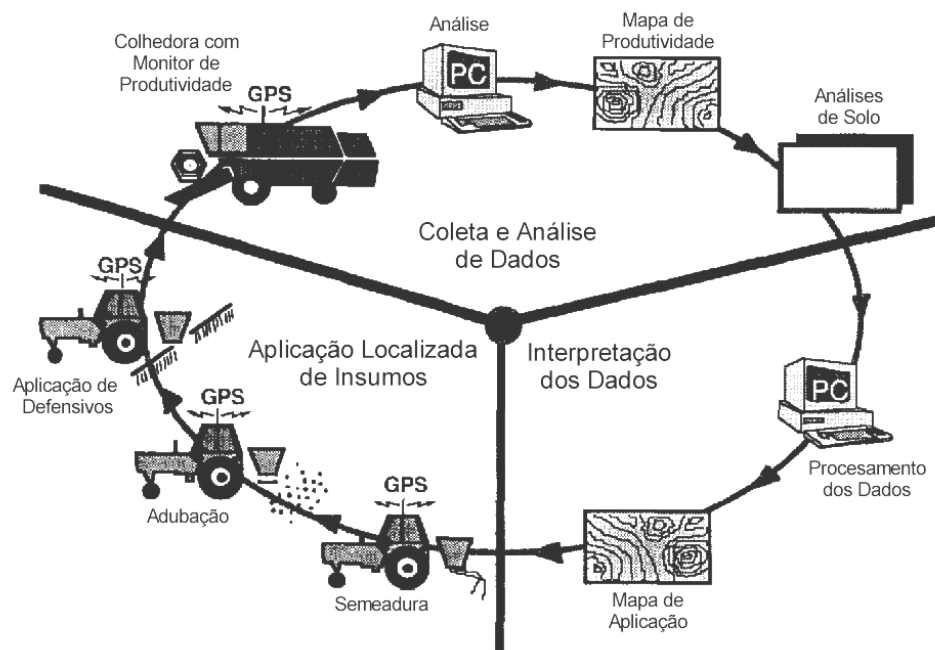
Segundo SARAIVA et al. (1998) a agricultura de precisão é uma tecnologia que demanda uma grande quantidade de dados para a tomada de decisão e pressupõe a aquisição e a manipulação de uma quantidade muito maior de dados para a tomada de decisão do que a agricultura tradicional.

FRAISSE e FAORO (1998) destacam que a agricultura de precisão permite ainda construir bancos de dados espaciais e temporais importantes no desenvolvimento de técnicas visando o uso racional do solo, com conseqüente redução de custos e impactos ambientais.

Segundo diversos autores, a agricultura de precisão pode ser dividida em três grandes etapas:

- Coleta de dados com o objetivo de mapear a variabilidade espacial e temporal do campo;
- Análise dos dados e tomada de decisões;
- Aplicação localizada de insumos agrícolas.

As etapas da agricultura de precisão constituem-se um ciclo que é repetido à cada safra. Uma cuidadosa avaliação dos resultados deve ser realizada em cada uma das etapas, reavaliando a estratégia utilizada e permitindo um refinamento de todo o processo. A Figura 1 ilustra as etapas da agricultura de precisão.



*Figura 1 – Etapas da Agricultura de Precisão
(adaptada de STAFFORD, 1996a)*

SARAIVA et al. (1998) esclarecem que a etapa de coleta dos dados tem o objetivo de identificar a variabilidade existente em um campo da produção e dos diversos fatores de produção (principalmente parâmetros de solo, mas também presença de pragas, ervas daninhas, etc.). Os autores colocam que nesta etapa, uma extensa coleta de dados da própria produção (colheita) e dos fatores de produção deve ser feita, sempre com um nível de detalhe que evidencie a variabilidade espacial em campo. Para isso, diversos equipamentos são utilizados: coletores de dados e amostradores de solo – automáticos ou manuais, imagens de satélite, fotos aéreas, entre outros.

Segundo ZHANG et al. (2002), a variabilidade tem significativa importância na produção agrícola e pode ser categorizada em seis grupos:

- Variabilidade de produção: distribuição histórica e atual da produção;
- Variabilidade do campo: topografia, inclinação, terraços;

- Variabilidade do solo: fertilidade do solo, propriedades físico-químicas, umidade, quantidade de matéria orgânica, condutividade hídrica, compactação, profundidade do solo;
- Variabilidade da cultura: densidade da cultura, altura da cultura, estresse hídrico da planta, quantidade de radiação fotossintética;
- Variabilidade por fatores anômalos: doenças, infestações, danos causados por intempéries;
- Variabilidade pelo gerenciamento: práticas agrícolas, cultivo misto, rotação de culturas, aplicação de defensivos, irrigação.

Quanto à etapa de análise de dados e tomada de decisões, SARAIVA et al. (1998) ponderam que é necessário se processar os dados para inicialmente quantificar a variabilidade existente medida e avaliar sua relevância. Em seguida, o processamento tenta relacionar a variabilidade da produção com a dos fatores de produção, buscando relações inequívocas de causa-efeito, a partir das quais se possam propor estratégias de gerenciamento agrícola que levem em conta esse cenário de variabilidade. Esse procedimento, normalmente “*off-line*”, é baseado em programas específicos – sistemas especialistas, Sistemas de Informações Geográficas – SIG³, etc., normalmente executados em microcomputadores. O resultado final desta etapa, continuam os autores, deve constituir em mapas que quantificam as ações a serem tomadas em campo, a cada ponto, para as diversas operações do processo produtivo, em particular aquelas relacionadas à aplicação dos diversos insumos, e levando em conta o potencial de produção de cada parte do talhão. Esses mapas serão transferidos para as máquinas que irão realizar a aplicação localizada de insumos.

MAOHUA (2001) lembra que a agricultura de precisão considera uma questão de fundamental importância que é a variabilidade, seja do solo, da cultura, ataque de plantas daninhas, etc. Através deste conceito é possível implementar técnicas específicas em cada

³ Do inglês GIS: *Geographical Information System*.

ponto para um maior rendimento da cultura e um menor gasto de recursos. Com isso, torna-se necessário a utilização de tecnologias de posicionamento global (GPS⁴), a definição de um sistema de informações referenciadas geograficamente e o uso de sensoriamento remoto.

Já segundo SWINTON e LOWENBERG-DEBOER (2001), a agricultura de precisão é o conjunto de quatro tecnologias: determinação de localização (através de GPS), sistema de informações geográficas (SIG), controle de aplicação de insumos a taxas variáveis e automação da coleta e atualização dos dados da cultura.

Para a aplicação localizada de insumos é necessário se dispor de máquinas agrícolas com a capacidade de realizar a aplicação de insumos em taxa variável ao longo do talhão, de forma automática e levando em conta sua posição no talhão, descrevem SARAIVA et al. (1998). A aplicação é feita com base nos mapas elaborados numa etapa anterior, que contêm a recomendação da aplicação detalhada para cada ponto do campo.

Para AUERNHAMMER (2001), na aplicação de fertilizantes a agricultura de precisão tem obtido ótimos resultados de produtividade, diminuindo o uso de fertilizantes e reduzindo a poluição causada por estes, pois o conceito da agricultura de precisão está associada com a aplicação de fertilizantes em pontos específicos.

Alguns autores consideram ainda a existência de uma quarta etapa no ciclo da agricultura de precisão. Essa etapa seria a da avaliação dos resultados e na verdade estaria distribuída ao longo de todo o ciclo.

FRAISSE e FAORO (1998) afirmam que a agricultura de precisão promete reverter o quadro atual, permitindo a aplicação de insumos agrícolas nos locais corretos e nas quantidades requeridas. Afirmam ainda que essa nova filosofia de manejo faz uso intensivo de tecnologias que foram desenvolvidas fora do contexto tradicional de pesquisa agropecuária, tais como sistemas de posicionamento por satélite (GPS / GLONASS⁵), sistemas de informações geográficas (SIG) e sensoriamento remoto.

⁴ GPS: *Global Positioning System*.

⁵ GLONASS: *Global Navigation Satellite System*.

Contudo, COX (2002) justifica que agricultura de precisão não é resultado apenas da utilização de equipamentos de posicionamento, hoje empregados em larga escala, mas sim de um conjunto de equipamentos visando a coleta de dados e a execução de tarefas.

A implementação da agricultura de precisão depende do desenvolvimento tecnológico para coletar e utilizar a grande quantidade de dados requeridos para se entender a variabilidade espacial da produtividade da lavoura e os fatores que a influenciam.

FRAISSE e FAORO (1998) conclui que o fator mais importante na adoção de novas tecnologias pelo produtor é o econômico. Ele ressalta, porém, que os benefícios econômicos da aplicação de novas tecnologias variam em função da cultura, da heterogeneidade da área plantada e ainda com outros fatores como, por exemplo, o clima. Neste sentido, a agricultura de precisão requer o uso intensivo de tecnologias de ponta, sendo necessário o estabelecimento de um programa de treinamento adequado de mão-de-obra e de disponibilidade de assistência técnica eficiente.

MAOHUA (2001) pondera que em países em desenvolvimento, a agricultura de precisão pode se tornar um problema devido à falta de informação e pessoas qualificadas para a utilização de tais tecnologias. Porém, prossegue o autor, muitos países em desenvolvimento têm se beneficiado da disponibilidade de informações, seguindo modelos ou adaptando novas tecnologias à sua realidade.

As pesquisas devem ser implementadas em conjunto com produtores agrícolas, fabricantes e pesquisadores, para que se possam identificar culturas e regiões onde a aplicação da agricultura de precisão possa trazer maiores benefícios.

Embora muitos autores encarem a agricultura de precisão como uma tecnologia que pode conseguir ganhos de produtividade, observa-se uma tendência crescente na valorização dos aspectos de otimização da utilização dos insumos agrícolas e com a preservação do meio ambiente.

2.2 Mapas de Produtividade

O mapa de produtividade (ou mapa de colheita) de uma determinada cultura mostra a quantidade colhida do produto a cada ponto geo-referenciado da lavoura e visa, primariamente, a determinação da variabilidade espacial da produtividade.

Os primeiros mapas de produtividade foram para áreas com culturas comerciais de milho, soja, trigo e sorgo granífero e foram produzidos no início dos anos 90, como afirmam FRAISSE e FAORO (1998).

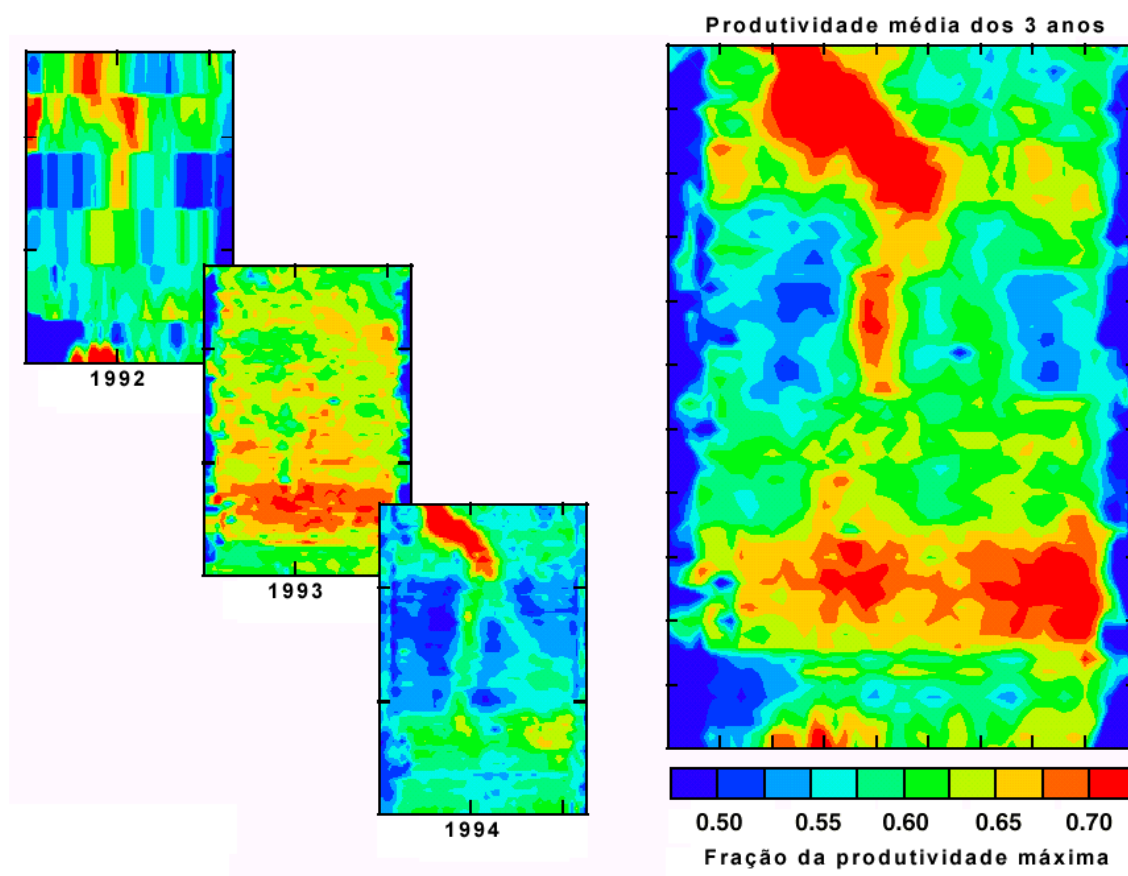
Segundo os mesmos autores, mapas de produtividade são excelentes fontes de informação e diagnósticos das condições de produção encontradas no campo. Afirmam ainda que no Missouri – EUA⁶, os mapas têm sido criados anualmente para culturas de soja, milho e sorgo, através de colhedoras equipadas com GPS e sensores para medição de fluxo de massa e teor de umidade de grãos. A variabilidade encontrada no campo tem sido surpreendente, segundo os autores, e, na maioria dos casos, os índices de produtividade medidos nas áreas mais produtivas são duas vezes superiores aos medidos nas áreas menos produtivas.

Ainda segundo FRAISSE e FAORO (1998), é importante ressaltar que a produtividade medida no campo, em um determinado ano, pode ser extremamente diferente da medida no ano seguinte devido às variações das condições climáticas. A quantificação desta variabilidade, tanto espacial quanto temporal, permite identificar áreas com maior potencial produtivo, nas quais pode valer a pena um maior investimento em insumos para maximização da produtividade.

Geralmente os mapas de produtividade são obtidos com colhedoras equipadas com sensores para medição de fluxo de massa e umidade do material colhido. Tais colhedoras também devem possuir um sistema de posicionamento que permita determinar sua exata posição no campo. A tecnologia do GPS foi eleita como o sistema de localização apropriado para a geração de mapas de produtividade, porém sistemas de posicionamento por rádio, microondas ou laser também podem ser usados. Um exemplo de mapas de produtividade pode

⁶ EUA: Estados Unidos da América.

ser observado na Figura 2, onde tons de azul indicam uma menor produtividade enquanto tons de vermelho indicam uma maior produtividade.



*Figura 2 – Mapas de produtividade da colheita
(adaptada de SUDDUTH, 1999)*

A variabilidade da produtividade também pode ser obtida através da interpretação de imagens obtidas por sensoriamento remoto (imagens de satélite ou fotografias aéreas), contudo, com menor precisão.

Sobre esse assunto, FRAISSE e FAORO (1998) colocam que o uso de sensoriamento remoto na agricultura não é novo. Imagens de satélite vêm sendo usadas há algum tempo para monitoramento agrícola. Entretanto, os sensores existentes atualmente possuem resoluções espaciais e espectrais que, embora úteis, deixam a desejar em um programa de agricultura de precisão. Porém, continuam FRAISSE e FAORO (1998), a introdução de novos sensores comerciais com altas capacidades de resolução espacial e espectral terá um impacto

importante na agricultura. Estes sensores permitirão a obtenção de informações detalhadas a respeito das condições da cultura no campo que poderão, por sua vez, serem utilizadas para a programação de aplicações localizadas de fertilizantes, pesticidas e água para irrigação.

Segundo CAPPELLI (1997), o mapa de produção é apenas uma etapa de todo o processo que envolve a agricultura de precisão e representa o efeito combinado de diversas fontes de variabilidade espacial e temporal. Ainda segundo CAPPELLI (1997), uma parte dessa variabilidade pode ser atribuída a fatores que são constantes ou variam lentamente, enquanto outros fatores são transitórios, mudando em importância e distribuição espacial de uma safra para outra.

Quanto à variabilidade espacial e temporal, FRAISSE e FAORO (1998) afirmam que o desenvolvimento de uma cultura depende de diversos fatores como o índice de radiação solar, concentração de oxigênio e gás carbônico, temperatura adequada e disponibilidade de água e nutrientes. A disponibilidade de água para a cultura, por exemplo, varia espacialmente de acordo com o tipo de solo, topografia da área, presença de ervas daninhas e depende ainda de processos estocásticos como o clima. Os autores prosseguem concluindo que o impacto do clima na produtividade é muitas vezes mais importante do que os aspectos espaciais. Ainda segundo os mesmos autores, estudos têm demonstrado uma baixa correlação entre as quantidades de fertilizante aplicadas e a produtividade obtida, quando outros fatores, como o clima, não são levados em consideração.

FRAISSE e FAORO (1998) sugerem que para áreas com menor potencial produtivo, medidas corretivas visando a melhoria da produtividade, podem ou não ser tomadas, dependendo do fator a ser corrigido e da viabilidade econômica da correção. Certos fatores, geralmente chamados de primários, estão relacionados com as características físicas do terreno, como a profundidade do solo, e são de difícil correção. Outros fatores, chamados de secundários, como o nível de fertilidade ou de pH do solo, são mais facilmente corrigidos, dependendo principalmente de aspectos econômicos.

BALASTREIRE (1998) considera o mapeamento da produtividade como uma das fases da agricultura de precisão que apresenta maior facilidade de execução devido ao número

de pesquisas já realizadas nos países mais desenvolvidos, e o grande número de opções de equipamentos existentes para esta finalidade, principalmente para culturas de cereais.

2.3 Mapas de Fertilidade do Solo

FRAISSE e FAORO (1998) afirmam que a variabilidade do solo no campo é um dos fatores mais importantes num programa de agricultura de precisão, pois influencia diretamente a disponibilidade de nutrientes e água para as culturas. Atualmente a maneira mais comum para amostragem do solo é o estabelecimento de uma rede de pontos (conhecida também como *grid*) espaçados regularmente no campo. O espaçamento utilizado nas áreas experimentais varia entre 20 e 30 metros. No caso de áreas comerciais, o número de amostras coletadas cai para 1 a 2,5 amostras por hectare, devido ao custo envolvido no processo de amostragem e análise do solo.

REICHARDT (1985), citado por Fraisse e Faoro (1998) coloca que as variações encontradas no solo são devidas às taxas variáveis nas quais atuaram os processos de sua formação e devidas às diversas atuações do homem durante o seu cultivo. Certos parâmetros do solo como textura, por exemplo, são independentes das técnicas de manejo empregadas. Todavia, a variabilidade espacial e temporal dos índices de fertilidade é resultante da combinação de diversos fatores como tipo de solo, clima e técnicas de manejo empregadas. A Figura 3 apresenta exemplos de mapas de solo para concentração de fósforo e potássio e também dos níveis de pH, onde tons de azul indicam uma menor concentração de nutrientes enquanto tons de vermelho indicam uma maior concentração de nutrientes.

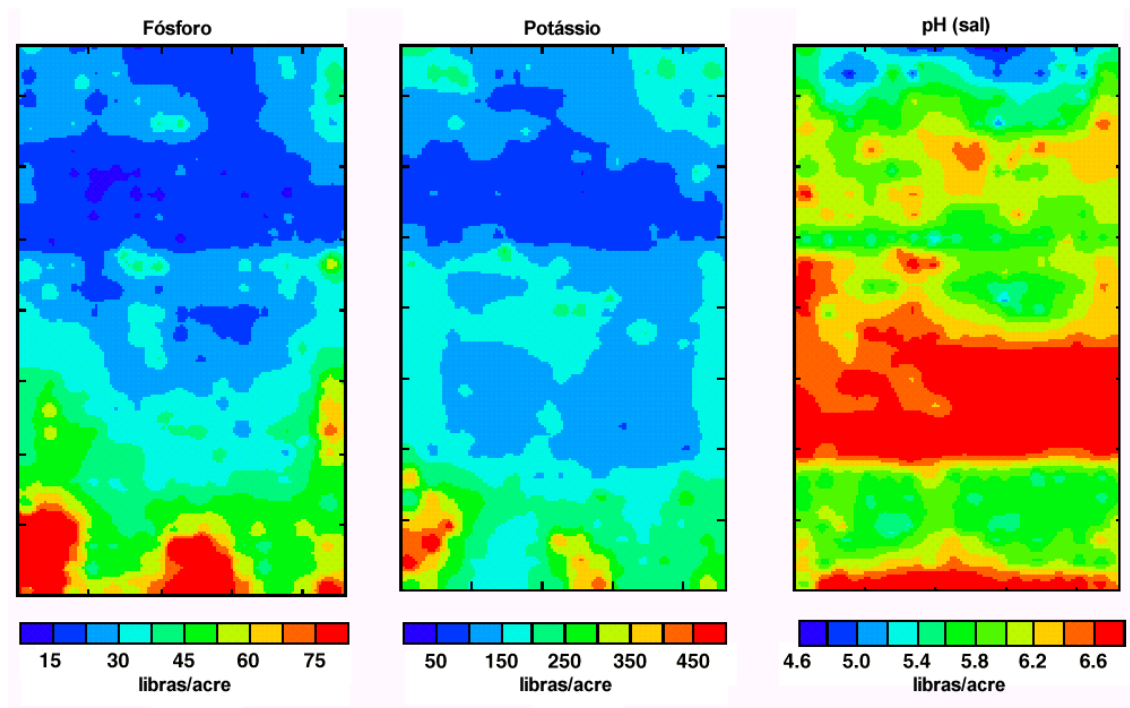


Figura 3 – Mapas de fertilidade solo (adaptada de SUDDUTH, 1999)

2.4 Mapas de Aplicação

MARTINS (1999) expõe que tradicionalmente a recomendação para a adubação tem sido realizada baseando-se na fertilidade do solo, obtida através de amostras e análises do solo, e na quantidade necessária de nutrientes para o desenvolvimento da cultura, considerando um determinado nível esperado da produção. Esta recomendação fundamenta-se em dados médios e não permite a correção da variabilidade espacial da disponibilidade de nutrientes para as plantas.

Segundo CAPPELLI (1997), basicamente as informações espaciais e temporais georeferenciadas do meio físico, associadas a um mapa de produtividade, possibilitarão a confecção dos mapas de aplicação localizada de insumos. Estes mapas de aplicação deverão ser utilizados pelas máquinas de aplicação localizada. O autor prossegue afirmando que as correlações existentes entre a produtividade e as informações provenientes do meio físico em

que se desenvolve a cultura precisam ainda ser bem determinadas e entendidas, possibilitando um amplo campo para a investigação científica.

Os mapas de aplicação de insumos precisam ter rigoroso fundamento técnico, pois a aplicação localizada e precisa de insumos não surte efeito se sua prescrição não estiver correta.

Para SUDDUTH (1999), o mapa de aplicação de insumos representa a interface entre o processamento de dados e o equipamento de aplicação. Um equipamento para aplicação de um único produto necessita apenas de um mapa de aplicação, porém, um equipamento para a aplicação de múltiplos produtos necessita de um conjunto de mapas de aplicação.

Haverá, também, a necessidade de desenvolvimento de aplicativos computacionais para auxiliar o agricultor na manipulação do grande volume de informação disponível para o processo de tomada de decisão.

2.5 Tecnologia de Aplicação Variável

Para completar o ciclo da agricultura de precisão são necessários equipamentos com capacidade de aplicar, de forma precisa, insumos a taxas variáveis. O desenvolvimento da denominada “Tecnologia de Aplicação Variável” (VRT⁷) requer pesquisas tanto na área de gerenciamento de dados, como no projeto de equipamentos dedicados.

Para SARAIVA et al. (1998), uma vez resolvidos os problemas de coleta de dados, tem-se a questão dos equipamentos e programas específicos, que utilizam técnicas baseadas em conhecimento para obter as otimizações desejadas. Naturalmente a grande amplitude de aplicações e de objetivos permitem a estratificação das implementações em diversos níveis, cada um com seus requisitos e recursos (equipamentos e programas) específicos. Uma característica importante que muitos dos novos equipamentos devem possuir é a capacidade de aplicar os insumos à taxa variáveis (como por exemplo: sementes, defensivos, fertilizantes, etc.), o que vem impulsionando muitas empresas a realizar pesquisa e desenvolver produtos para atender a essa necessidade.

⁷ Do inglês VRT: *Variable Rate Technology*.

SUDDUTH (1999) coloca que a tomada de decisões para aplicação localizada de insumos pode ser implementada de maneira “*on-line*” ou “*off-line*”. Na tomada de decisões de forma *on-line* ou baseada em sensores em tempo real, o equipamento controlado incorpora sensores, sendo os dados de tais sensores usados imediatamente para o controle automático da aplicação. Nos equipamentos que operam de forma *off-line* ou baseados em mapas de aplicação, os dados são coletados, armazenados e processados em uma operação distinta, e o equipamento utiliza essas informações para efetuar a aplicação. A tecnologia baseada em mapas de aplicação permite maior flexibilidade na manipulação dos dados e no pré-processamento, porém requer que a localização do equipamento no campo seja precisamente definida. Segundo o autor, a maioria dos sistemas hoje disponíveis são baseados em mapas de aplicação, mas os sistemas *on-line* deverão se tornar disponíveis quando a tecnologia de sensores em tempo real se tornar mais evoluída. Sistemas híbridos, que se baseiam tanto no mapa de aplicação, como nos sensores em tempo real, podem se tornar cada vez mais difundidos.

MORGAN e ESS (1997) resumiram as vantagens e desvantagens dos sistemas baseados em mapas de aplicação, como se segue:

Vantagens dos sistemas baseados em mapas de aplicação:

- Não necessitam de sensores de solo ou de plantas, que atualmente são limitados em disponibilidade;
- A quantidade necessária de insumo pode ser estimada antes do equipamento ir ao campo;
- Existe um intervalo de tempo entre a coleta de dados e a operação de aplicação, permitindo uma intensiva análise e processamento de dados, podendo melhorar os resultados;
- O sistema é capaz de antecipar as taxas de aplicações necessárias nos próximos locais de aplicação no campo, minimizando erros devido a atrasos.

Desvantagens dos sistemas baseados em mapas de aplicação:

- Requer o uso de um sistema de posicionamento, como o GPS, para se determinar sua exata localização;
- Dados ou amostras devem ser coletados, analisados, e seus resultados devem ser organizados para um mapeamento;
- Um aplicativo computacional especializado (e o conhecimento para utilizá-lo) é necessário para produzir os mapas;
- Erros de posicionamento durante a coleta de dados e na aplicação podem gerar imprecisão;
- A geração de mapas de aplicação por interpolação de dados discretos pode causar erros nas regiões situadas entre os pontos de amostragem;
- Não são muito apropriados para controlar aplicações baseadas em características que variam muito rapidamente (por exemplo, nível de nitrato no solo).

Os equipamentos de aplicação variável podem ser classificados segundo o tipo de produto aplicado:

- Sementes;
- Agroquímicos secos (fertilizantes e defensivos granulares, aplicação de calcário, etc.);
- Agroquímicos líquidos (fertilizantes e defensivos líquidos, etc.).

Os dispositivos de aplicação variável baseados em mapas, normalmente são constituídos por sensores, controladores e atuadores (Figura 4). Os sensores têm a função de medir uma determinada variável e enviar um sinal elétrico ao controlador. Os sensores normalmente encontrados em um equipamento VRT são de fluxo (mássico e volumétrico), de

pressão, de presença, de velocidade angular e linear, de peso, etc., podendo-se ainda, considerar o receptor de GPS como um sensor de posição.

Os controladores são dispositivos eletrônicos, normalmente microprocessados, que têm a função de variar a taxa de aplicação em função de informações obtidas dos sensores e do mapa de aplicação de insumos. Alguns controladores possuem dispositivos de armazenamento de dados, interface para cartões de memória padrão PCMCIA⁸, *display* e teclado multifunções para configuração, operação e monitoramento do equipamento.

Os atuadores, em um equipamento VRT, são dispositivos que respondem aos sinais do controlador, regulando a quantidade de material aplicado a cada instante de tempo. Os atuadores mais comuns são: válvulas de fluxo, atuadores hidráulicos e pneumáticos, motores hidráulicos e elétricos, bombas, etc.

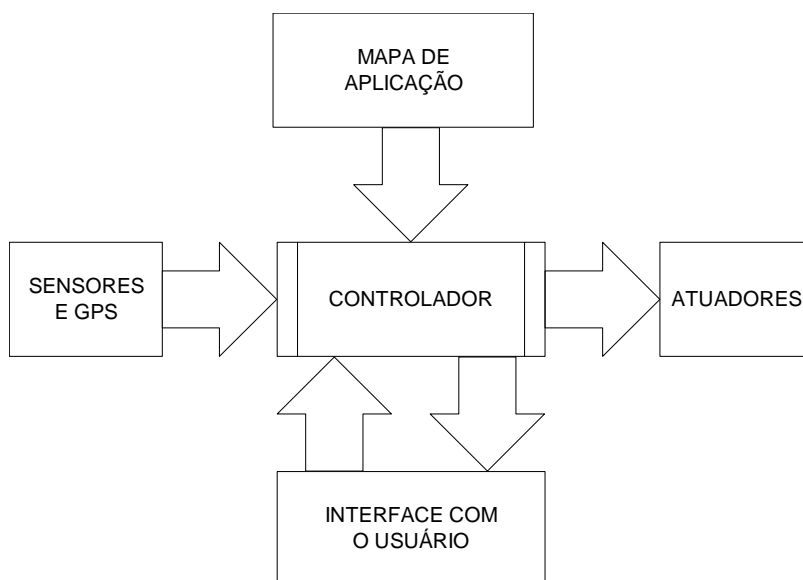


Figura 4 – Diagrama de blocos componentes de um equipamento de aplicação variável

MONICO (2000) destaca que a agricultura de precisão utiliza, principalmente, três tecnologias principais: GPS, SIG e VRT. Segundo o autor, o GPS possibilita a localização e a orientação das máquinas em qualquer lugar do campo, como por exemplo, durante uma

⁸ PCMCIA: *Personal Computer Memory Card International Association*.

operação de colheita. O equipamento VRT integrado ao GPS e SIG possibilita a aplicação de insumos em local específico, com doses variáveis. Essa integração fornece informações que permitem aos produtores aplicar insumos, tais como fertilizantes, herbicidas e defensivos, em doses e locais apropriados, o que favorece a proteção do meio ambiente.

Quanto à precisão do sistema de posicionamento, BALASTREIRE (1994) afirma que deve ser sub-métrica, para permitir que a aplicação seja feita exatamente no local e na quantidade requerida, utilizando-se assim o máximo potencial de produtividade da cultura.

Segundo FRAISSE e FAORO (1998), para o posicionamento de tratores usados na aplicação de produtos agroquímicos é desejável uma maior precisão, evitando-se a dupla aplicação ou a aplicação em locais incorretos.

Atualmente são disponíveis comercialmente alguns equipamentos com a tecnologia de aplicação variável, porém, os que apresentam maior grau de desenvolvimento são os aplicadores de agroquímicos líquidos e sólidos.

FRAISSE e FAORO (1998) destacam que diversos equipamentos foram desenvolvidos recentemente para a aplicação a taxa variável de insumos como: fertilizantes líquidos e granulados, herbicidas, semente e água para irrigação.

Como exemplo de equipamentos VRT existem espalhadores que, segundo MORGAN e ESS (1997), são normalmente utilizados para aplicar somente um produto de cada vez, através de dois discos rotativos localizados na parte posterior do aplicador. Uma correia ou corrente transporta o material de um depósito e alimenta os discos rotativos pela parte superior. O material passa através de uma válvula que controla a quantidade do produto que cai sobre os discos. A taxa de aplicação do produto pode ser ajustada através da mudança da abertura da válvula ou da mudança na velocidade da correia transportadora.

Para a aplicação de insumos sólidos secos, os equipamentos podem possuir sistemas pneumáticos. Esses equipamentos operam com produtos químicos secos, que são transportados pelo fluxo de ar até placas defletoras na saída do sistema, cuja função é desacelerar e distribuir uniformemente o produto. Esses equipamentos normalmente possuem depósitos que são conectados ao local de aplicação através de conexões pneumáticas. O controle da taxa de aplicação é realizado através do fluxo de ar. Um ou mais produtos podem

ser misturados e dosados durante a operação, através de controladores individuais em cada depósito.

Para MORGAN e ESS (1997), os pulverizadores de agroquímicos líquidos com tecnologia VRT têm a função de fornecer uma taxa variável de saída do produto (volume por unidade de tempo). Porém a taxa de aplicação, volume por unidade de área, é afetada tanto pela taxa de saída do produto, como pela variação na velocidade do equipamento. O autor ressalta que para manter a taxa de aplicação no valor desejado, a velocidade de deslocamento é continuamente monitorada e a taxa de saída do produto é ajustada para compensar mudanças na velocidade. São utilizadas válvulas de controle de fluxo para variar a taxa de aplicação. Além da velocidade de deslocamento do equipamento, informações baseadas em um mapa de aplicação podem ser utilizadas para se variar a taxa de aplicação dos agroquímicos.

Uma das fontes de erro nos sistemas de aplicação a taxas variáveis é o atraso de tempo que existe entre o momento da necessidade de alteração da taxa, até o momento em que o insumo, a uma nova taxa, chega efetivamente na cultura e no ponto desejado de aplicação. Tal atraso ocorre devido ao tempo para o processamento das informações e atuação por parte do controlador, porém, um tempo muito maior é necessário para que o fluxo de material atinja os valores desejados. Uma forma de se minimizar tais erros seria antecipando-se a atuação do equipamento, através de informações como a velocidade e a direção do seu deslocamento.

De acordo com CAPPELLI (1997) a decisão de investir na pesquisa agropecuária nacional é, antes de tudo, estratégica, já que, dada as características distintas do nosso processo produtivo, grande parte das tecnologias necessárias não estão disponíveis em qualquer outro lugar do mundo para que simplesmente sejam importadas e aplicadas.

2.6 Adubação

Antes de se realizar a adubação de um solo, é necessário levar em consideração algumas questões: o que está faltando, quanto está faltando, quando aplicar, como realizar a aplicação, quais são os custos e qual o efeito na produtividade.

Inicialmente é necessário se verificar quais elementos estão no solo em nível insuficiente e que, por isso, prejudicam a produção, devendo, portanto, ser adicionados na adubação. Feito isto, é necessário definir a quantidade em que o adubo deve ser fornecido para cobrir a diferença entre o exigido pela cultura e o que o solo é capaz de suprir. Em geral utiliza-se o resultado da análise de solo para definir estes parâmetros de adubação.

Outro ponto importante na adubação é estipular a época ou as épocas da vida da planta em que o elemento deve ser fornecido como adubo para garantir o maior aproveitamento possível, diminuindo-se as perdas e, portanto, proporcionando economia nas quantidades aplicadas.

O método tradicional de recomendação para adubação de culturas anuais baseia-se na determinação média da disponibilidade de nutrientes no solo e na produtividade esperada. Tradicionalmente, a recomendação para a adubação tem sido realizada baseando-se na fertilidade do solo, obtida através de amostragens e análises do solo, e na quantidade necessária de nutrientes para o desenvolvimento da cultura, considerando-se um determinado nível esperado de produção. Esta recomendação fundamenta-se em dados médios e não permite a correção da variabilidade espacial da disponibilidade de nutrientes para as plantas.

No contexto da agricultura de precisão procura-se minimizar a variabilidade espacial da disponibilidade de nutrientes através da aplicação localizada de adubo na quantidade suficiente e necessária para a uniformização da produtividade. Também é importante definir o lugar onde se deve aplicar o adubo em relação à posição da semente ou das raízes da muda ou da planta em formação ou em produção, quando se tratar de culturas perenes. Aplicar adubo no lugar certo é tão importante quanto a sua dose e o momento adequado.

Estudos, como o reportado por VESETH (2001), demonstram a necessidade da adoção de uma estratégia de aplicação localizada de fertilizantes a taxas variáveis. O autor relata que em uma área estudada, o rendimento da produção de trigo de inverno freqüentemente variava entre 2,09 e 6,96 toneladas por hectare, sendo a média de todo o campo 5,22 toneladas por hectare. Quando aplicado uniformemente nitrogênio no campo para uma produção esperada de 5,22 toneladas por hectare, áreas de alta produtividade eram sub fertilizadas, reduzindo o rendimento potencial e o conseqüente lucro. Reciprocamente, áreas de baixo potencial de

produção eram fertilizadas com quantidades acima do necessário, reduzindo o lucro líquido através do aumento do custo da adubação.

No Brasil, existem cerca de 400 empresas que trabalham com a produção de fertilizantes. Estas indústrias suprem a demanda nacional de fertilizantes que gira em torno de 8,5 milhões de toneladas por ano.

Uma das dificuldades encontradas na formulação de adubos é a carência de aplicativos especializados que permitam o melhor aproveitamento possível da produção, evitando desperdícios de produtos, matérias primas ou mesmo mão de obra, com uma conseqüente melhora na qualidade dos produtos e maximização dos lucros.

2.7 Sistemas de Posicionamento Global

Os sistemas de navegação global por satélite, ou simplesmente GNSS⁹, tornaram-se disponíveis para uso civil a partir de 1995. No momento, há dois sistemas GNSS: o sistema NAVSTAR GPS¹⁰ desenvolvido pelos EUA e o GLONASS de propriedade russa. Há outros projetos de navegação por satélite em desenvolvimento pela União Européia, Japão e Canadá. O NAVSTAR GPS, conhecido simplesmente por GPS é, na atualidade, o sistema de posicionamento global mais difundido e utilizado.

O Sistema de Posicionamento Global (GPS) foi desenvolvido pelos militares americanos, na década de 70 do século passado, com o objetivo de fornecer a exata localização de suas tropas militares em todo o planeta.

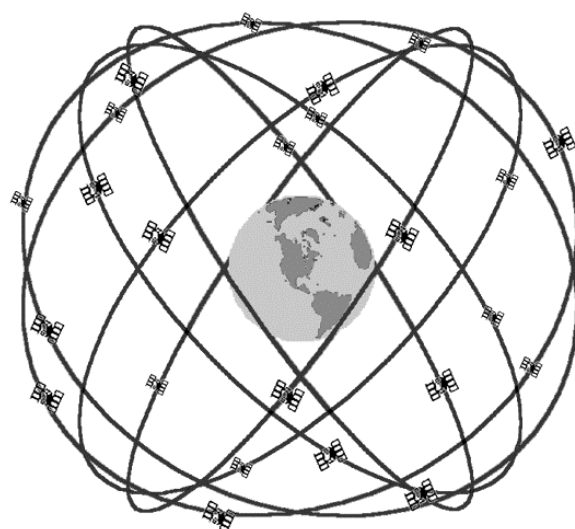
O GPS pode ser definido resumidamente como um sistema de rádio navegação através do uso de satélites. Na realidade, por conveniência, acostumou-se a chamar o receptor GPS simplesmente de GPS, o que teoricamente é um erro, pois GPS se refere a todo o sistema em si

⁹ GNSS: *Global Navigation Satellite Systems*.

¹⁰ NAVSTAR GPS: *NAVigation System with Time And Ranging Global Positioning System*.

(satélites, receptores, bases, etc.). O GPS é constituído de três segmentos: espacial, de controle e do usuário.

O segmento espacial atualmente é constituído por 24 satélites operacionais, existindo três de reserva, distribuídos em seis planos orbitais e em órbita de aproximadamente 20200 quilômetros da Terra. Nesta distância cada satélite realiza duas órbitas completas por dia (órbita de 12 horas). Devido à elevada altitude dos satélites há pouca resistência atmosférica e sua órbita é muito estável. A Figura 5 ilustra a distribuição dos satélites na órbita terrestre.



Constelação nominal do GPS
24 satélites em 6 planos orbitais
4 satélites em cada plano
20.200 km de altitude, 55 graus de inclinação

*Figura 5 – Constelação de satélites do GPS
(adaptada de DANNA, 2000)*

Esta configuração torna possível observar, durante 24 horas por dia, pelo menos quatro satélites, simultaneamente, em qualquer parte do mundo. Isso garante uma leitura com precisão adequada, a qualquer hora e em qualquer ponto do planeta.

Os satélites do GPS são equipados com relógios atômicos que utilizam um material radioativo para fazer a medida do tempo. A precisão desses relógios torna possível o uso desses satélites para navegação e mapeamentos. Para um funcionamento correto de todo o sistema, apenas um relógio por satélite é necessário, porém cada satélite possui mais três relógios atômicos de reserva. Cada satélite emite duas ondas portadoras de rádio, em uma

banda denominada L, geradas por um mesmo relógio atômico. Os dois canais de frequência transportam códigos de posicionamento e comunicação, sendo chamados de L1 e L2. O sinal L1 transporta o sinal C/A¹¹ e também o sinal de precisão, denominado P¹². O sinal L2 transporta apenas o código de precisão, sendo disponível apenas para uso militar ou ainda para aparelhos receptores autorizados.

O segmento de controle é constituído por cinco estações terrestres, uma principal e quatro secundárias, que têm a função de monitorar e controlar os satélites. As estações de monitoramento captam e processam os sinais dos satélites, enviando dados para a estação principal. Estas informações são utilizadas para calcular as órbitas exatas dos satélites e atualizar os sinais de navegação emitidos por estes. Existem problemas com a interferência do campo gravitacional e com outros fenômenos que podem afetar as órbitas dos satélites. Os resultados são então transmitidos, periodicamente, pela estação principal, para cada um dos satélites para efetuar as devidas correções.

O segmento do usuário é constituído pelos receptores de GPS, que podem ser instalados em veículos ou utilizados por pessoas para se determinar a posição dos mesmos. Alguns receptores possibilitam também o armazenamento de informações sobre cada ponto e indicação de velocidade e direção de deslocamento. Os dados obtidos podem ser armazenados no próprio receptor ou, em alguns casos, em coletores de dados eletrônicos a eles acoplados.

O princípio básico do funcionamento da tecnologia do GPS está na trilateração¹³, utilizando os satélites como pontos de referência (Figura 6). O receptor GPS determina a sua posição medindo a sua distância dos satélites do sistema no espaço.

¹¹ C/A: *Course/Acquisition*.

¹² P: *Precision*.

¹³ A trilateração é um processo de levantamento semelhante à triangulação, sendo que em lugar da formação dos triângulos a partir da medição dos ângulos, o levantamento será efetuado através da medição dos lados.

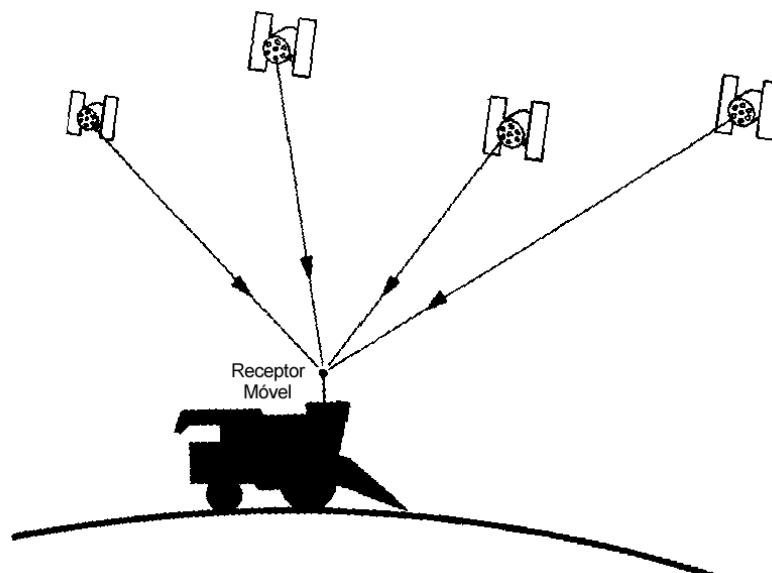


Figura 6 – Funcionamento do GPS
(adaptada de MORGAN e ESS, 1997)

Cada satélite emite, de forma contínua, informações de sua posição e um sinal de tempo para sincronismo. O receptor determina o tempo que o sinal leva para percorrer a distância entre o satélite e o receptor. Conhecendo as coordenadas do satélite num sistema de referência adequado, pode-se determinar as coordenadas do usuário.

Pelo ponto de vista puramente geométrico (distância tridimensional) bastariam apenas três satélites (equivalendo ao cálculo de três distâncias). A quarta observação então, é necessária para sincronizar o relógio do receptor com os relógios dos satélites. Esta falta de sincronização é a razão pela qual se usa o termo “pseudodistância”.

O acesso ao sistema se dá de forma ininterrupta, em todo o planeta, independentemente das condições meteorológicas (embora estas interfiram de certa forma na precisão das medidas). Portanto, os aparelhos de GPS fornecem informações de latitude, longitude e altitude usando sinais de quatro satélites.

Segundo ROCHA (2002), a determinação da distância e da posição do satélite é calculada com base nos dados contidos no almanaque (tabela dos números dos satélites com seus parâmetros orbitais) armazenado no receptor GPS. Uma vez calculada a posição, o receptor GPS terá de 5 a 12 satélites em vista. O receptor, continuamente, seleciona os

melhores satélites para o cálculo das posições, a uma taxa de uma nova posição por segundo. Para determinação de posição bidimensional (*2D Navigation*: latitude e longitude) são necessários pelo menos três satélites com boa geometria, ao passo que, para determinação de posições tridimensionais (*3D Navigation*: latitude, longitude e altitude) são necessários quatro ou mais satélites.

Ainda segundo ROCHA (2002), testes realizados com receptores de navegação civis evidenciaram uma precisão prática na ordem de 15 a 40 metros, o que obrigou os militares americanos a imporem um distúrbio proposital no relógio do satélite, de tal forma que os receptores não autorizados gerassem posições com precisão em torno de 100 metros.

Este distúrbio imposto aos usuários não autorizados é denominado Disponibilidade Seletiva (S/A¹⁴). A Disponibilidade Seletiva é uma degradação proposital no serviço SPS¹⁵, elaborado pelo Departamento de Defesa dos EUA (DoD¹⁶), da precisão do GPS para algo em torno de 100 metros na horizontal, 156 metros na vertical e 340 nanossegundos no tempo. Este fator foi eliminado em maio de 2000. Atualmente, este sinal de interferência se encontra desativado pelo governo norte americano, o que reduziu a imprecisão para até 15 metros no posicionamento horizontal.

2.7.1 Correção diferencial

Para se melhorar a precisão do GPS, pode ser utilizada a chamada “correção diferencial”, sendo esse sistema chamado de Sistema de Posicionamento Global Diferencial (DGPS¹⁷) ou ainda GPS diferencial. O funcionamento do DGPS baseia-se na suposição de que o erro na determinação de um ponto é semelhante para todos os receptores situados em uma área com até centenas de quilômetros.

¹⁴ S/A: *Selective Availability*.

¹⁵ SPS: *Standard Positioning Service*.

¹⁶ DoD: *Department of Defense*.

¹⁷ DGPS: *Differential Global Positioning System*.

Neste sistema, um receptor fixo é instalado em uma localização conhecida, podendo-se conhecer a diferença entre a posição obtida através do GPS fixo (chamado GPS base) e a posição real, possibilitando a correção diferencial do erro. Esta correção é feita através de processadores que calculam os erros e refinam as coordenadas obtidas. Como os satélites estão em constante movimento, os valores para correção diferencial são válidos para poucos segundos de intervalo.

Para que a correção diferencial possa ser realizada, algumas condições devem ser preenchidas:

- A estação base (receptor fixo de referência) não deve estar muito distante da área de operação do receptor móvel, de modo que a constelação de satélites seja a mesma para os dois receptores. Os sinais de correção são válidos para uma distância de até 400 quilômetros da estação base. Porém, para que a precisão máxima seja obtida, a distância entre ambos deve ser de até 50 quilômetros;
- A estação base deve estar localizada em um ponto de coordenada cartográfica precisamente conhecida;
- Os dados gerados pela estação base e pela estação móvel devem ser compatíveis e ocorrerem simultaneamente.

A correção diferencial pode ser realizada após a coleta dos dados. Neste caso são necessários um aplicativo adequado para pós-processamento e o registro simultâneo de dados para ambos os receptores.

Em alguns sistemas, a estação fixa envia imediatamente para o receptor móvel, o sinal de correção diferencial, sendo denominado “correção diferencial em tempo real”.

Normalmente o sinal de correção diferencial, em tempo real, pode ser obtido através de rádios-faróis (*beacons*) operados pela marinha, estações de rádio terrestres ou sinais de correção transmitidos via satélite. Os rádios-faróis são fixos e operam normalmente na região costeira, podendo cobrir uma faixa de até 300 quilômetros do litoral.

As estações de rádio terrestre para transmissão de sinal de correção diferencial normalmente operam em frequência modulada (FM¹⁸) e têm alcance máximo de aproximadamente 100 quilômetros, não estando disponíveis comercialmente no Brasil.

A transmissão de sinais de correção por satélites é através do uso de satélites geo-estacionários, que cobrem uma área muito grande. Tais sinais são fornecidos por empresas que cobram anuidades para a sua utilização. Os dados de correção, obtidos de diversas estações estrategicamente localizadas, são enviadas a uma estação central de controle da rede que, após verificações de qualidade e otimizações, os envia para o satélite distribuidor.

Uma outra tecnologia de correção diferencial, em tempo real, é a denominada WAAS¹⁹ que, segundo LECHENER e BAUMANN (2000), é uma técnica para melhorar o desempenho do GPS que utiliza um satélite geo-estacionário e possui algumas estações terrestres para o monitoramento.

O sistema WAAS consiste no uso de estações terrestres posicionadas estrategicamente que monitoram os dados enviados pelos satélites convencionais do GPS. Os dados coletados são então analisados e, em caso de erro, são criadas e enviadas mensagens de correção das diferenças detectadas, para um ou mais satélites do sistema WASS, posicionados em órbitas geo-estacionárias, em volta do equador, os quais reenviam estes dados de correção para receptores GPS que tenham a capacidade de captar sinais do sistema WAAS.

Teoricamente o sistema WAAS permite uma capacidade de localização cinco vezes melhor que o sistema convencional. Um receptor GPS equipado com a tecnologia WAAS possibilita localizações com margem de erro até três metros em 95 % da utilização.

Originalmente o sistema WAAS foi desenvolvido pela agência de aviação americana FAA²⁰ para ser usado como sistema de navegação aérea, permitindo uma orientação com precisão na aproximação de aeronaves na pista. Nesta situação, somente o GPS convencional

¹⁸ FM: *Frequency Modulation*.

¹⁹ WAAS: *Wide Area Augmentation System*.

²⁰ FAA: *Federal Aviation Administration*.

não preenche os requisitos exigidos devido aos erros provocados por perturbações na propagação dos sinais e erros devido à variações nas órbitas dos satélites. Embora o sistema WAAS ajude a corrigir muitos destes erros, ainda assim não foi aprovado para uso em aviação. Contudo está disponível para uso civil, para navegação marítima ou terrestre.

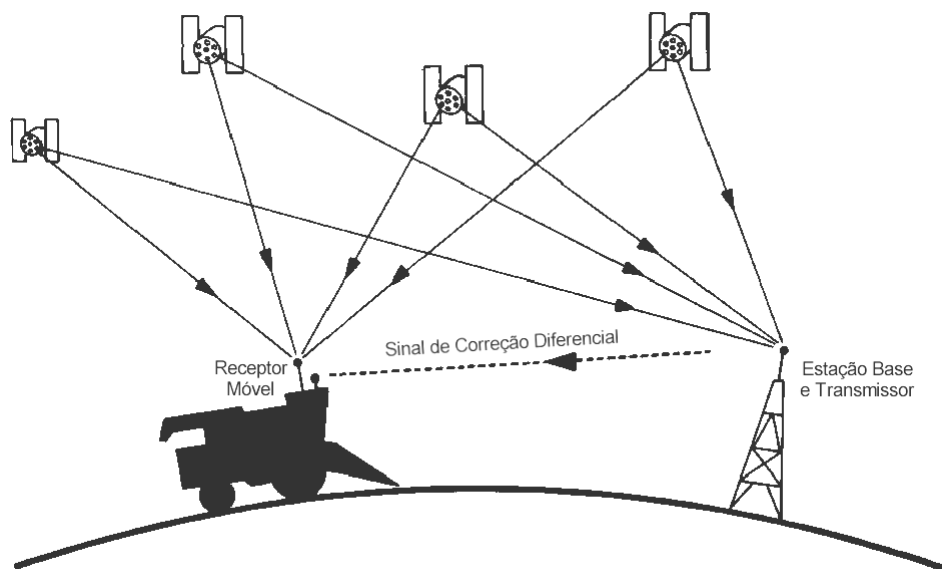
O sistema WASS originalmente só funcionava nos Estados Unidos, mas atualmente outros governos estão desenvolvendo sistemas idênticos e compatíveis com o sistema WAAS americano. Na Ásia já opera o sistema japonês MSAS²¹, enquanto que na Europa opera o sistema EGNOS²². Infelizmente não existe nenhum tipo de sistema semelhante ao WAAS em operação, ou mesmo em desenvolvimento, para utilização na América do Sul.

Uma alternativa para a obtenção do sinal de correção diferencial é através de uma estação de base de correção privada, sendo necessário para isto um receptor GPS base e um transmissor de rádio. Dentro da área de alcance do rádio transmissor, tem-se o sinal de correção que pode ser captado pelo receptor GPS móvel através de um receptor de rádio adequado (Figura 7).

Para a utilização do DGPS é necessário que o receptor GPS seja compatível com tal tecnologia e que permita o recebimento do sinal de correção através do meio de transmissão escolhido.

²¹ MSAS: *Multi-Functional Satellite Augmentation System*.

²² EGNOS: *Euro Geostationary Navigation Overlay Service*.



*Figura 7 – Conceito da correção diferencial em tempo real
(adaptada de MORGAN e ESS, 1997)*

Na maioria dos modos de operação DGPS, o erro de posicionamento pode variar de 1 a 20 metros, dependendo de vários fatores associados ao procedimento e equipamentos utilizados. Segundo GORGULHO (2001), o DGPS é um processo que permite ao usuário civil obter uma precisão de 20 milímetros a 5 metros, pelo processamento contínuo de correções nos sinais, dependendo da qualidade do receptor e do sinal de correção utilizados. As correções são transmitidas em frequência modulada (FM) ou via satélite e estão disponíveis em alguns países através de serviços de subscrição taxados. Podem também ser transmitidas por um segundo receptor GPS ou por faróis de navegação localizados num raio de até 100 quilômetros do usuário. É necessário ter uma antena receptora DGPS conectada ao receptor GPS convencional em ambos os casos.

Segundo MONICO (2000), o DGPS foi desenvolvido com o objetivo de minimizar os efeitos da disponibilidade seletiva (S/A) imposta ao GPS no modo absoluto (SPS). Consiste de uma técnica que melhora a precisão e a integridade (probabilidade de que a posição informada atenda às especificações exigidas) do GPS. Sua utilização original foi na navegação, mas atualmente é empregada em diversas atividades, inclusive na agricultura. O autor afirma ainda, que estando a estação base localizada nas proximidades da região de interesse, há uma forte

correlação entre os erros calculados na estação base e os erros da estação móvel. Desta forma, se o usuário receber estas correções, é possível corrigir as posições coletadas pela estação móvel. A aplicação de correções nas posições é o método mais simples de se utilizar em DGPS.

Há, atualmente, diversas aplicações em diversas áreas que fazem uso do sistema DGPS, podendo-se destacar: geo-referenciamento, levantamentos topográficos (agrícolas, florestais, urbanos, etc.), cadastros para atualização de sistemas de informações geográficas, posicionamento preciso de embarcações náuticas, veículos terrestres (rastreamento de posição) e aéreos, controle de terraplenagem, locação de coordenadas (furos de sondagem, implantação de projetos, etc.), navegação precisa, entre outros.

STAFFORD (1996b), citado por Elias (1998), afirma que diferentes operações ou atividades exigem diferentes precisões dos sistemas de GPS. Para o mapeamento da produtividade, por exemplo, não há necessidade de se utilizar sistemas de posicionamento com precisão superior a 10 metros. Já para a aplicação localizada de defensivos entre as linhas de plantio, a precisão do sistema de posicionamento deve ser maior ou igual a 100 milímetros. O autor salientou ainda que quanto maior a precisão dos equipamentos destinados à realização das operações localizadas, maior o custo desta operação.

FRAISSE e FAORO (1998) consideram que uma vez tomada a decisão de se iniciar um programa de agricultura de precisão, um dos passos é decidir qual a precisão requerida para o sistema de posicionamento. Como regra geral, espera-se que o mapa base do campo tenha a melhor precisão possível, uma vez que vai servir de base para todas as análises e operações de campo. Os autores afirmam ainda que quanto a outros dados coletados, como solo e produtividade da cultura, a precisão varia com o tipo de dado coletado e a finalidade da informação obtida. Para o posicionamento das amostras de solo e de dados de produtividade (mapas de colheita), geralmente é tolerada uma precisão na ordem de 1 a 3 metros.

A precisão exigida no posicionamento geográfico em uma dada operação agrícola deve ser compatível à precisão oferecida pelo equipamento utilizado. Caso contrário, se a precisão do equipamento for insuficiente, o resultado da operação poderá ser insatisfatório. Enquanto

que, se o equipamento apresentar precisão superior à exigida, o mesmo estará sendo subutilizado.

Segundo LECHENER (2000), para diversas atividades que requerem o uso dos sistemas GPS, incluindo as aplicações na agricultura, fatores como a precisão, disponibilidade (maior alcance) e integridade, podem não ser alcançados utilizando somente um sistema receptor GNSS (GPS ou GLONASS). Para incrementar a performance do sistema pode-se fazer uso de estações de referência DGPS local e regional.

FRAISSE e FAORO (1998) concluem que o uso da correção diferencial é requerido na maioria das operações em campo, embora em alguns casos, como na coleta de dados de produtividade com colhedoras, os dados de posicionamento possam ser pós-processados.

Sistemas de informações geográficas, principalmente nas áreas de engenharia civil, engenharia florestal, engenharia cartográfica, geografia, etc., podem fazer uso das vantagens do GPS com correção diferencial. Empresas públicas e privadas podem utilizar o GPS diferencial para planejamento urbano como, por exemplo, em operações de plantio e poda de árvores, mapeamento de vias públicas, estacionamentos, redes elétricas, entre outras. O sistema também pode ser usado no mapeamento de recursos naturais, tais como: nascentes e cursos de rios, mananciais, árvores e florestas, jazidas minerais, etc.

Nas atividades modernas são praticamente ilimitadas as utilizações do GPS e principalmente do GPS com correção diferencial. Atualmente, observa-se um crescimento significativo na utilização de sistemas de GPS, principalmente devido à redução do preço de tais equipamentos.

2.7.2 Protocolo NMEA de comunicação

Os receptores GPS podem transmitir informações de posicionamento e outras informações referentes ao funcionamento do sistema em diversos formatos. Um dos conjuntos de protocolos mais utilizado é o desenvolvido e padronizado pela *National Marine Electronic Association* (NMEA). Trata-se de uma linguagem padrão da indústria para equipamentos de

navegação. Existem diferentes formatos NMEA, entre os quais, pode-se citar: NMEA 0180, NMEA 0182, e NMEA 0183. A maioria dos receptores GPS tem saída NMEA de dados.

Segundo SANTOS (2003), o protocolo NMEA 0183 foi desenvolvido visando à concepção de dispositivos eletrônicos para utilização marítima. A sua primeira versão foi liberada em março de 1983. O padrão NMEA 0183 define características elétricas do sinal, protocolo da transmissão de dados, sincronismo e formatos específicos de sentenças de transmissão. Este padrão tem sido constantemente atualizado, e a sua última versão, denominada 3.01, é datada de janeiro de 2002.

Todas as sentenças do protocolo NMEA consistem de no máximo 82 caracteres no código ASCII²³. O Quadro 1 apresenta a estrutura geral de uma sentença no formato NMEA 0183.

Quadro 1 – Campos de uma sentença NMEA 0183

\$	Código do Dispositivo	Tipo de Sentença	,	Informações da Sentença	,	(A/V)	,	*	Checksum	CR/LF
----	-----------------------	------------------	---	-------------------------	---	-------	---	---	----------	-------

Todos os campos de dados são separados por vírgulas (“,”) e têm comprimento variável. Os campos nulos também são delimitados por vírgulas (“,”), mas não contêm nenhuma informação.

Uma sentença NMEA é iniciada com o caractere “\$” e finalizada com os caracteres CR²⁴/LF²⁵. Após o caractere de início de sentença, têm-se os seguintes campos de dados:

- Código do dispositivo (*talking device*): indica o dispositivo que está fazendo a transmissão;

²³ ASCII: *American Standard Code for Information Interchange*, Código Padrão Americano para Intercâmbio de Informação.

²⁴ CR: *Carriage Return*.

²⁵ LF: *Line Feed*.

- Tipo de sentença: indica o formato da sentença;
- Informações da sentença: hora, localização, entre outras;
- A/V: indica se uma sentença é ou não válida (A para válida e V para inválida);
- Soma para controle (*checksum*): código utilizado para correção de erros. Corresponde ao valor da soma, representada em oito bits, de todos os caracteres na mensagem, incluindo as vírgulas entre os campos, porém não considera os caracteres “\$” e “*”. O resultado, em hexadecimal, é convertido para dois caracteres ASCII (0 – 9, A – F). O caractere mais significativo aparece primeiro.

Alguns códigos de dispositivos encontrados para utilização no segundo campo de uma sentença NMEA são: AG²⁶, CV²⁷ e GP²⁸.

SANTOS (2003) apresenta os códigos de alguns dos fabricantes²⁹ de equipamentos que adotam o formato NMEA: ASH (Ashtech), CMP (C-Map), CSI (Communications Systems Intl), DAS (Dassault Sercel), DNT (Del Norte), FEC (Furuno Electric Corp.), GRM (Garmin Corp.), HPK (Hewlett Packard), e HWM (Honeywell Marine).

O Quadro 2 apresenta algumas sentenças NMEA comumente utilizadas por receptores GPS.

²⁶ AG: *Autopilot General*.

²⁷ CV: *Communications Radio-Telephone – VHF*.

²⁸ GP: *Global Positioning System*.

²⁹ A citação de marcas comerciais não indica recomendação do autor quanto à sua utilização.

Quadro 2 – Sentenças NMEA comumente utilizadas

Sentença	Denominação
ALM	<i>GPS Almanac Data</i>
GBS	<i>GNSS Satellite Fault Detection</i>
GGA	<i>GPS Fix Data</i>
GLL	<i>Position Data</i>
GRS	<i>Range Residuals</i>
GSA	<i>GPS DOP and Active Satellites</i>
GST	<i>GPS Pseudorange Noise Statistics</i>
GSV	<i>GPS Satellite in View</i>
MSS	<i>Beacon Receiver Signal Status</i>
RMC	<i>Recommended Minimum Specific GPS Data</i>
VTG	<i>Course Over Ground and Ground Speed</i>
XTE	<i>Cross-Track Error</i>
ZDA	<i>Time and Date</i>

2.8 Sistemas de Controle

Nos últimos anos, os sistemas de controle têm assumido uma importância crescente no desenvolvimento e avanço da tecnologia. Praticamente todas as atividades envolvidas no nosso dia a dia são afetadas por algum tipo de sistema de controle. Sobre esse tema, KUO (1990) afirma que os sistemas de controle são encontrados em abundância em setores da indústria, tais como: controle de qualidade e fabricação de produtos, linha de montagem automática, controle de ferramentas, tecnologia espacial e de armamento, sistemas de transporte, sistemas de potência, robôs e muitos outros.

Para OGATA (1990), sistemas de controle automático representam um papel vital no avanço da engenharia e da ciência. Além de possuir importância extrema em diversos sistemas

como: sistema de pilotagem automática de aviões, mísseis teleguiados, veículos espaciais, etc., tornou-se uma parte integrante e importante dos processos industriais e de fabricação modernos.

Já segundo KUO (1995), recentemente os sistemas de controle têm assumido uma importância crescente no desenvolvimento e avanço da tecnologia e da civilização moderna. Sistemas de controle são encontrados em abundância em todos os setores da indústria, como controle de qualidade na fabricação de produtos, linhas de montagem automáticas, controle de máquinas de ferramentaria, tecnologia aeroespacial e de armamento, controle de computadores, sistemas de transporte, sistemas de potência, robótica e muitos outros.

Segundo BOLTON (1995), o controle digital por meio de microprocessadores está sendo usado cada vez mais em sistemas de controle. Uma das vantagens do controle digital sobre os sistemas de controle analógicos é a flexibilidade. Sobre essa questão, OGATA (1990) resume as vantagens dos controladores digitais sobre os analógicos em alguns aspectos principais. Controladores digitais são capazes de realizar complexas operações computacionais com precisão constante a grande velocidade. Computadores digitais podem ter quase qualquer grau de precisão nos cálculos com um aumento relativamente pequeno no custo. Controladores digitais são extremamente versáteis, pois através de uma nova programação, pode-se modificar completamente as operações que estão sendo executadas.

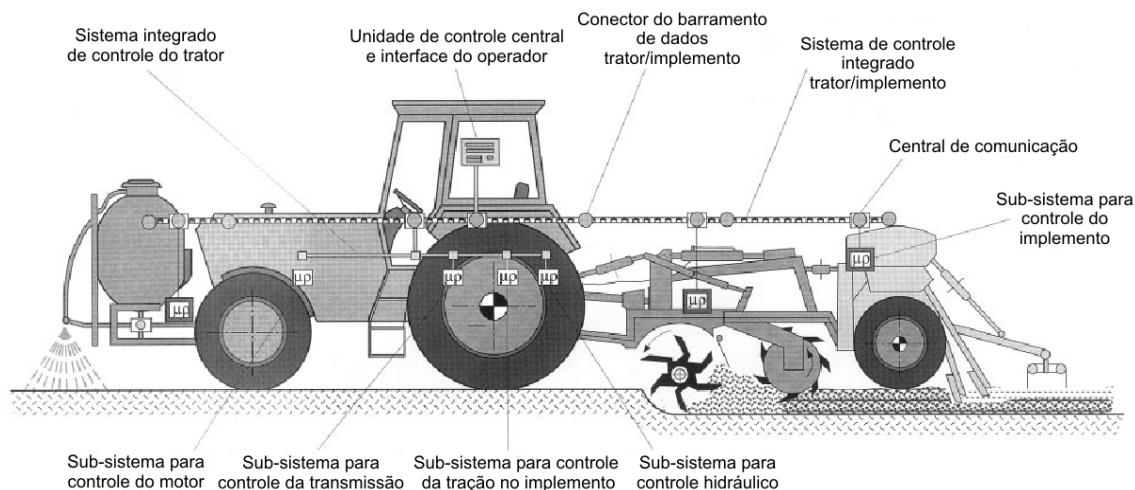
Sistemas de controle têm sido cada vez mais utilizados em máquinas e equipamentos agrícolas. É comum encontrarmos tratores e colhedoras agrícolas equipadas com diversos sistemas automáticos para controle de tarefas que, tradicionalmente, eram realizadas pelo próprio operador da máquina.

Segundo SCARLETT (2001), a implantação de sistemas de controle para a automação pode gerar um incremento de 15 a 20 % na eficiência de operação do trator agrícola. Além da maior eficiência na operação mecânica, a implantação de sistemas de controle ajuda a reduzir o esforço mental do operador, diminuindo sua fadiga e aumentando seu rendimento e qualidade de trabalho. O autor propõe um controle de um sistema trator-implemento (Figura 8) que incorpora as seguintes características:

- Sub-sistema baseado em um microprocessador dedicado, que tem por função controlar os sub-sistemas do trator: motor; transmissão (normalmente do tipo “*powershift*³⁰” ou ainda variável continuamente); sistema eletro-hidráulico de força do implemento; controle de tração (controle da tração de cada roda, controle do bloqueio do diferencial);
- Microprocessador dedicado que tem a função de controlar os sub-sistemas do implemento utilizado;
- Unidade de controle central e interface com o operador (localizado na cabine do trator);
- Rede de intercomunicação e controle ligando os sub-sistemas individuais e o controle central e interface do operador.

Ainda segundo SCARLETT (2001), o sistema de controle de transmissão pode atuar em conjunto com o sistema do implemento. Ao se identificar que a roda do trator está deslizando, automaticamente os sistemas de controle reduzem a profundidade do implemento, em conjunto com um aumento do peso sobre o eixo traseiro reduzindo assim o deslizamento das rodas e mantendo uma maior eficiência do conjunto.

³⁰ O câmbio *powershift* permite que algumas marchas, de um determinado grupo, possam ser trocadas sem o uso de embreagem. Isso permite que o operador possa fazer a mudança em movimento, sem interromper o trabalho. Alguns modelos têm ainda um dispositivo reversor que permite ao condutor mudar de direção, indo para frente ou para trás.



*Figura 8 – Estrutura proposta de um sistema integrado de controle
(adaptada de SCARLETT, 2001)*

O projeto de sistemas do controle envolve diversas etapas, tais como: especificação do projeto, configuração do controlador, escolha do tipo de controlador, determinação dos parâmetros do controlador, simulação, etc.

2.8.1 Especificações de desempenho

Qualitativamente, o desempenho de um controlador pode ser avaliado pela sua capacidade de manter a variável controlada próximo ao valor desejado (*setpoint*), mesmo na presença de perturbações externas.

OGATA (2003) expõe que em muitos casos práticos, as características de desempenho desejadas de sistemas de controle são especificadas em termos de grandezas no domínio do tempo.

Ainda segundo o mesmo autor, frequentemente, as características de desempenho de um sistema de controle são especificadas em termos de sua resposta transitória para uma entrada do tipo degrau unitário. A utilização deste tipo de excitação se deve ao fato de que esta entrada é suficientemente brusca e pode ser gerada com facilidade. Se a resposta a uma

entrada em degrau é conhecida, matematicamente é possível calcular a resposta para qualquer entrada.

DORF e BISHOP (2001) consideram que um dos primeiros passos do procedimento de um projeto consiste em se especificar as medidas do desempenho desejado. O autor relaciona como especificações usuais no domínio do tempo: sobresinal percentual, tempo de acomodação, tempo de pico, tempo de subida e erro em regime estacionário.

OGATA (2003) prossegue afirmando que a resposta transitória de um sistema de controle na prática geralmente apresenta oscilações amortecidas antes de alcançar o estado ou regime estacionário. O autor apresenta na Figura 9 as características da resposta transitória de um sistema de controle submetido a uma entrada do tipo degrau unitário.

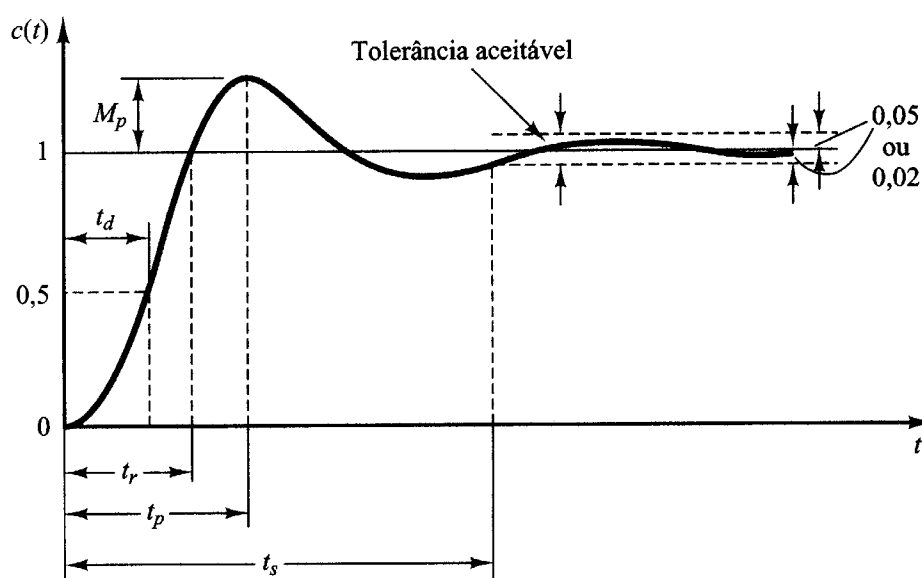


Figura 9 – Curva de resposta a uma entrada do tipo degrau unitário
(extraída de Ogata, 2003)

A partir da Figura 9, OGATA (2003) define as seguintes especificações de desempenho de sistemas de controle:

- Tempo de atraso (*delay time*), t_d : é o tempo necessário para que a resposta alcance a metade do valor final pela primeira vez;

- Tempo de subida (*rise time*), tr : é o tempo necessário para que a resposta passe de 10 % a 90 %, ou de 5 % a 95 %, ou ainda de 0 % a 100 % do valor final. Para sistemas de segunda ordem subamortecidos, o tempo de subida de 0 % a 100 % é o normalmente utilizado. Para os sistemas sobreamortecidos, o tempo de subida de 10 % a 90 % é o mais comumente usado;
- Tempo de pico (*peak time*), tp : é o tempo para que a resposta atinja o primeiro pico de sobresinal;
- Máximo sobresinal (*maximum overshoot*), Mp : é o máximo valor de pico da curva de resposta, medido a partir da unidade. Se o valor final da resposta em regime permanente diferir da unidade, então é comum utilizar porcentagem máxima de sobresinal, definido pela Equação 1. O valor do máximo (em porcentagem) do sobresinal indica diretamente a estabilidade relativa do sistema;

$$\text{Máximo sobresinal em porcentagem} = \frac{c(tp) - c(\infty)}{c(\infty)} \cdot 100\% \quad \text{Equação 1}$$

- Tempo de acomodação (*settling time*), ts : é o tempo necessário para que a curva de resposta alcance uma faixa (usualmente de 5 % ou 2 %) em torno do valor final, aí permanecendo indefinidamente. O tempo de acomodação está relacionado à maior constante de tempo do sistema de controle. Pode-se determinar que porcentagem deve ser utilizada no critério de erro (5 % ou 2 %), a partir dos objetivos do projeto de sistema em questão.

Segundo DORF e BISHOP (2001), a capacidade de se ajustar o desempenho em regime transitório e em regime permanente é uma característica vantajosa dos sistemas de controle com realimentação. Para se analisar e projetar um sistema de controle deve-se definir inicialmente uma medida para o seu desempenho e, com base no desempenho desejado,

podem se ajustar os valores dos parâmetros do controlador para que seja alcançada a resposta desejada.

Para OGATA (2003) as especificações de desempenho são muito importantes porque a maioria dos sistemas de controle são sistemas no domínio do tempo, isto é, devem fornecer respostas temporais aceitáveis.

Todos os critérios de desempenho abordados consideram a capacidade do sistema de levar a variável controlada para próximo do valor desejado o mais rapidamente possível. Em alguns casos, isto não é necessário, nem sempre desejável. Conclui-se então que antes de se aplicar um critério de desempenho qualquer é importante verificar se ele é justificado para o sistema de controle.

Outro aspecto não considerado nos índices de desempenho é quanto ao aspecto da robustez do controlador. Pode-se ajustar um controlador com um excelente desempenho para perturbações pequenas, porém instável quando ocorrer uma perturbação maior.

2.8.2 Classificação de sistemas de controle

Segundo OGATA (1990), um sistema de controle em malha aberta é aquele no qual a saída não tem efeito sobre a entrada. Em um sistema de controle em malha aberta, a saída não é medida e nem é realimentada para comparação com a entrada. Assim, a precisão do sistema depende de uma calibração, sendo que o sistema deve manter esta calibração de forma a operar corretamente. A Figura 10 ilustra um sistema de controle em malha aberta.

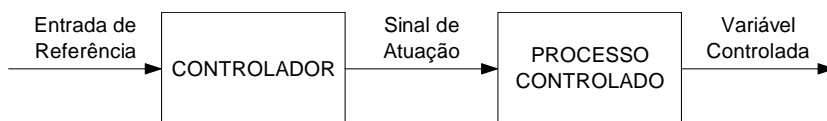


Figura 10 – Sistema de controle em malha aberta

Ainda segundo OGATA (1990), em qualquer sistema de controle em malha aberta, a saída não é comparada com a entrada de referência, conseqüentemente, a cada entrada de

referência corresponde uma condição de operação fixa. Ou seja, a precisão do sistema depende de uma calibração adequada. O autor completa afirmando que sistemas de controle em malha aberta devem ser cuidadosamente calibrados e devem manter essa calibração de forma a serem úteis.

OGATA (1990) define sistema de controle em malha fechada como aquele no qual o sinal de saída possui um efeito direto no sinal de entrada. Isto é, sistemas de controle em malha fechada são sistemas de controle realimentados. O sinal de erro atuante, que é a diferença entre o sinal de referência e o sinal realimentado, é fornecido ao controlador de modo a reduzir o erro e manter a saída do sistema em um valor desejado. Em outras palavras, o termo “malha fechada” implica no uso de ação de realimentação com a finalidade de reduzir o erro do sistema. A Figura 11 ilustra um sistema de controle em malha fechada.

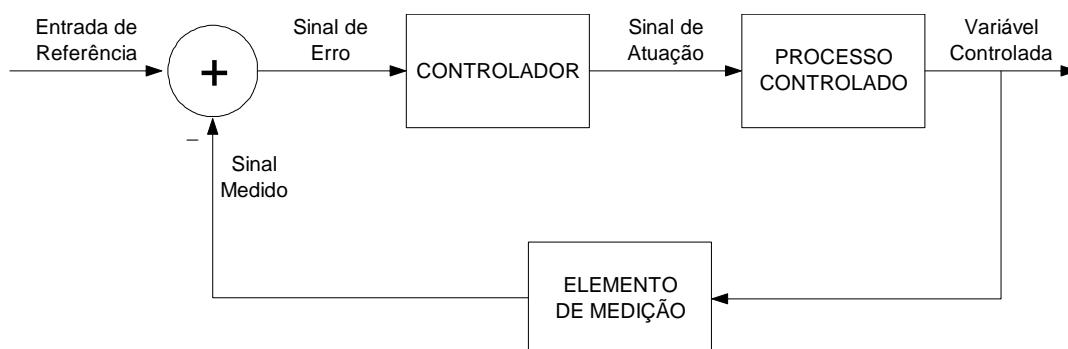


Figura 11 – Sistema de controle em malha fechada

Um controlador em malha fechada compara o valor real da saída do processo com o valor desejado, determina o desvio, e produz um sinal de controle que reduz o desvio a um valor nulo ou muito pequeno.

Para OGATA (1990), um controle realimentado se caracteriza por uma operação que, na presença de distúrbios, tende a reduzir a diferença entre a saída do sistema e a entrada de referência. Uma grande vantagem de um controle realimentado é a possibilidade de tornar a resposta do sistema praticamente insensível a distúrbios externos e a variações dos parâmetros do sistema. Dessa forma é possível a utilização de componentes mais baratos e sem muita precisão para se obter o controle preciso de um dado processo.

Segundo DORF e BISHOP (2001), o surgimento do controle com realimentação é um fato fundamental da indústria e da sociedade modernas. Os sistemas de controle operam em uma sequência em malha fechada: com a utilização de um sensor preciso, a saída medida é igual à saída real do sistema. A diferença entre a saída desejada e a saída real é igual ao erro, que então é ajustado pelo dispositivo de controle. A saída do dispositivo de controle faz com que o atuador controle o processo no sentido de reduzir o erro.

Segundo KUO (1995) sistemas de controle realimentados podem ser classificados de diversas formas em função do propósito da classificação. Dependendo do método de análise e projeto, os sistemas de controle podem ser classificados como lineares ou não lineares, variantes ou invariantes no tempo.

2.8.3 Controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID)

O controlador Proporcional + Integral + Derivativo, comumente conhecido por controlador PID, é uma combinação de controladores com ações Proporcional (P), Integral (I) e Derivativa (D). O controlador PID é um dos mais eficientes tipos de controle malha fechada utilizado.

OGATA (2003) afirma que mais da metade dos controladores industriais em uso atualmente empregam esquemas de controladores PID. Ainda segundo OGATA (2003), a utilidade dos controladores PID está na sua aplicabilidade à maioria dos sistemas de controle.

Sobre esse tema, DORF e BISHOP (2001) observa que a popularidade dos controladores PID pode ser atribuída parcialmente ao seu bom desempenho em uma ampla faixa de operação e parcialmente à sua simplicidade funcional, que permite aos engenheiros operá-los de um modo simples e direto.

Os controladores PID são bastante utilizados nas indústrias para controle de nível de líquidos, controle de temperatura, de velocidade de rotação de motores, de posicionamento mecânico, controle de vazão, controle de pressão em máquinas elétricas em geral, entre outros.

OGATA (2003) pondera que na área dos sistemas de controle de processos, os esquemas básicos de controle PID provaram sua utilidade, conferindo um controle satisfatório, porém, em muitas situações eles podem não proporcionar um controle ótimo.

Para se implementar um controlador PID em um dado processo, há a necessidade de serem determinados os parâmetros: ganho proporcional (Kp), ganho integral (Ki) e ganho derivativo (Kd) do controlador.

Um controlador do tipo PID é caracterizado pela combinação das ações proporcional, integral e derivativa, resumidas a seguir:

- Ação proporcional: um controlador do tipo proporcional produz um sinal de saída que é proporcional ao erro, respondendo imediatamente à sua ocorrência. Suas principais características são: diminuir o tempo de subida, aumentar o sobresinal, diminuir o erro em regime e praticamente não afetar o tempo de estabilização.
- Ação integral: um controlador do tipo integral responde com uma taxa proporcional ao erro atuante, ou seja, a velocidade de correção do controlador é proporcional ao erro. Raramente a ação integral é usada separadamente. Suas principais características são: diminuir o tempo de subida, aumentar o sobresinal, zerar o erro em regime e aumentar o tempo de estabilização.
- Ação derivativa: um controlador do tipo derivativo responde à taxa de variação do erro atuante, tendo um comportamento antecipatório. A ação derivativa não é usada separadamente. Suas principais características são: praticamente não afetar o tempo de subida, diminuir o sobresinal, praticamente não afetar o erro em regime, diminuir o tempo de estabilização.

A Equação 2 mostra a função de transferência, no domínio de Laplace, de um controlador do tipo PID. O Quadro 3 apresenta um resumo das alterações das especificações de desempenho (tempo de subida, sobresinal, erro estacionário e tempo de estabilização) em função de cada uma das ações do controlador PID. É importante considerar que as ações descritas podem não ocorrer exatamente como esperado, pois uma alteração em uma das ações pode modificar a atuação das demais ações.

$$G_c(s) = Kp + \frac{Ki}{s} + Kd s$$

Equação 2

Quadro 3 – Resumo das ações de um controlador PID

(\uparrow : aumento, \downarrow : diminuição, \leftrightarrow : não afeta e 0: zera)

Especificações de desempenho				
Ação	Tempo de subida	Sobresinal	Erro estacionário	Tempo de estabilização
P	\downarrow	\uparrow	\downarrow	\leftrightarrow
I	\downarrow	\uparrow	0	\uparrow
D	\leftrightarrow	\downarrow	\leftrightarrow	\downarrow

O controlador PID permite que os valores de ganho de cada uma das ações sejam ajustados individualmente, sendo permitido, até mesmo, que uma determinada ação seja removida do controlador. Porém, algumas observações de ordem prática são que o modo integral raramente é usado sozinho e que o modo derivativo jamais é usado sozinho.

Como as ações (proporcional, integral e derivativa) de um controlador do tipo PID são facilmente visualizadas no domínio do tempo, estes controladores são normalmente especificados e projetados através de métodos no domínio do tempo. Porém, as características de desempenho no domínio da frequência também podem ser consideradas, tanto no projeto, quanto na análise.

Tradicionalmente, o projeto de controladores PID pode ser feito baseado na resposta de um modelo matemático obtido a partir do conhecimento do processo que deverá ser controlado. Uma das dificuldades do projeto é encontrar os parâmetros de ganho proporcional, integral e derivativo do controlador PID, utilizado para controle do processo, em malha fechada, para que a saída da mesma acompanhe o sinal de excitação da melhor forma possível.

Quando se dispõe do modelo matemático do processo, é possível se empregar aplicativos de simulação computacional para se explorar o comportamento da saída do sistema de controle em função dos parâmetros do controlador. Pode-se também avaliar o comportamento do sistema de controle na presença de perturbações e com diversos tipos diferentes de sinais de excitação.

OGATA (2003) ressalta que em particular, quando o modelo matemático do processo não é conhecido e, portanto, métodos de projeto analítico não podem ser utilizados, controladores PID se mostram mais úteis.

2.8.4 Sintonia de controladores

O processo de escolha dos parâmetros (ganho proporcional, ganho integral e ganho derivativo) do controlador PID que assegurem a especificação de desempenho desejada é conhecido como sintonia do controlador.

A sintonia de controladores é um campo interessante da teoria de controle, com muita aplicação prática. Hoje são disponíveis um conjunto de regras, empíricas e matemáticas, que permitem sistematizar a busca de melhores desempenhos, sem comprometer a segurança do processo.

A determinação dos parâmetros do controlador PID é normalmente baseada no comportamento do sistema em malha fechada no regime transitório e no regime permanente.

No projeto de controladores PID, para se obter a característica de resposta desejada, diversos autores recomendam que sejam observadas as seguintes regras práticas:

- Inicialmente obter a resposta do sistema em malha aberta e definir quais especificações de desempenho devem ser melhoradas;
- Ajustar a ação proporcional para melhorar o tempo de subida;
- Ajustar a ação integral para eliminar o erro estacionário;
- Ajustar a ação derivativa para melhorar o sobressinal máximo;

- Ajustar cada um das ações de controle até que se obtenha a resposta geral desejada.

Enquanto que outros autores resumem as recomendações de ajuste dos parâmetros do controlador PID com os seguintes procedimentos:

- Se a resposta estiver muito lenta, deve-se aumentar a ação proporcional;
- Se a resposta estiver excessivamente oscilatória, deve-se aumentar a ação derivativa;
- Se o sobresinal estiver muito elevado, deve-se reduzir a ação integral;
- Se a resposta for inicialmente rápida e em seguida se tornar muito lenta, deve-se aumentar a ação integral.

Deve-se ter em mente que pode não ser necessário implementar todas as três ações de controle (proporcional, integral e derivativa) para se obter a resposta desejada do sistema.

2.8.5 Metodologia de Ziegler e Nichols

Se o modelo matemático que descreve o comportamento do processo do sistema a ser controlado puder ser obtido, é praticável a utilização de diversas técnicas de projeto para a determinação dos parâmetros do controlador PID. Porém, se o processo for muito complexo, ou quando a aplicação de leis físicas não traz resultados satisfatórios, o modelo matemático não poderá ser obtido facilmente e, desta forma, não é praticável uma abordagem analítica do projeto de controladores PID. Nestas situações é necessário se recorrer a uma metodologia experimental para sintonia dos controladores PID.

Segundo OGATA (2003), os pesquisadores Ziegler e Nichols³¹ sugeriram regras para a sintonia de controladores PID (ajuste dos parâmetros Kp , Ti ³² e Td ³³) baseadas na resposta experimental ao degrau ou no valor de um ganho de realimentação que resulta em uma estabilidade marginal.

O controlador PID, considerado na metodologia proposta por Ziegler e Nichols, possui a função de transferência mostrada na Equação 3.

$$G_c(s) = Kp \left(1 + \frac{1}{Ti s} + Td s \right) \quad \text{Equação 3}$$

O primeiro método sugerido por Ziegler-Nichols é conhecido como “método da curva de reação do processo” e o segundo método é conhecido por “método do ciclo máximo (*ultimate*)”. Ambos os métodos visam a obtenção de 25 % de sobressinal máximo na resposta ao degrau e são baseados nas características da resposta transitória do processo, obtida experimentalmente.

Primeiro método de Ziegler-Nichols

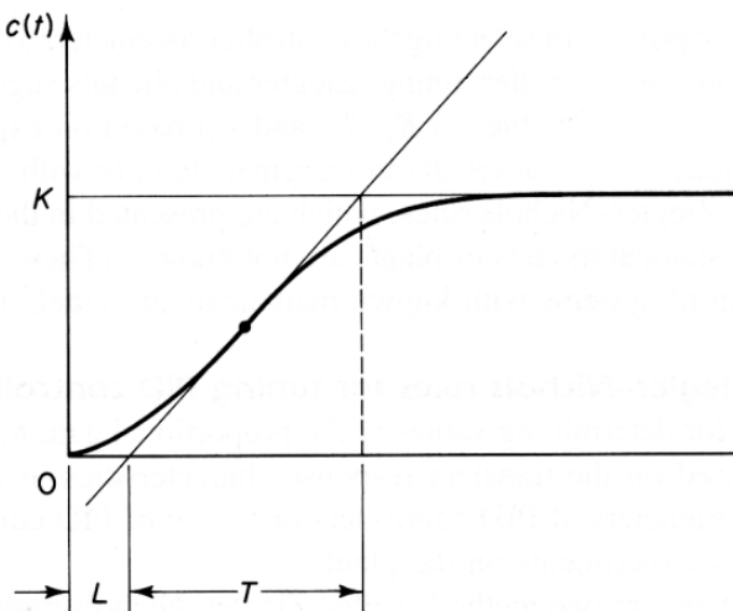
Este método se baseia na resposta da planta quando submetida a uma entrada do tipo degrau, obtida experimentalmente. Para a aplicação deste método, o processo deve possuir uma curva de resposta na forma de “S”, a uma excitação do tipo degrau, quando operado em malha aberta.

³¹ A metodologia proposta por J.G. Ziegler e N.B. Nichols foi apresentada pela primeira vez no artigo “*Optimum Settings for Automatic Controllers*” publicado em 1942 na “*Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*”.

³² Ti : Tempo integral.

³³ Td : Tempo derivativo.

OGATA (2003) afirma que se o modelo matemático do processo não possui integradores nem pólos complexos conjugados dominantes, então a curva de resposta ao degrau unitário pode ter o aspecto de uma curva em “S” como mostrado na Figura 12.



*Figura 12 – Curva de resposta do tipo “S”
(extraída de OGATA, 2003)*

Ainda segundo OGATA (2003), uma curva com formato “S” (Figura 12) pode ser caracterizada por duas constantes: o atraso L e a constante de tempo T . O atraso e a constante de tempo são determinados desenhando-se uma linha tangente ao ponto de inflexão da curva com o formato em “S” e determinando-se a intersecção da linha tangente com o valor constante K . A função de transferência $C(s)/U(s)$ de um sistema com uma curva de resposta do tipo “S” a um degrau unitário de entrada, pode ser aproximada por um sistema de primeira ordem com um atraso de transporte, como mostrado na Equação 4.

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-Ls}}{T s + 1} \quad \text{Equação 4}$$

Para a aplicação do primeiro método, o sistema deve operar em malha aberta. O Quadro 4 apresenta os valores dos parâmetros de um controlador PID sugeridos por Ziegler-Nichols a partir da aplicação do primeiro método de ajustagem, baseado nos valores do tempo atraso (L) e da constante de tempo (T).

Quadro 4 – Parâmetros do controlador PID segundo a metodologia de Ziegler-Nichols (primeiro método)

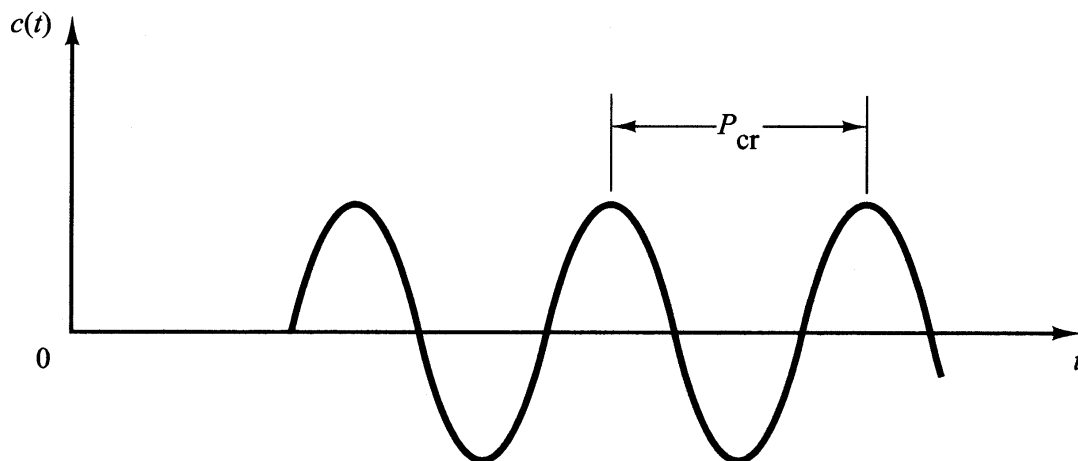
Controlador	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0,9 T/L$	$L/0,3$	0
PID	$1,2 T/L$	$2 L$	$0,5 L$

O controlador PID obtido a partir da aplicação do primeiro método de Ziegler-Nichols possui um pólo na origem ($s = 0$) e zeros duplos em $s = -1/L$.

Segundo método de Ziegler-Nichols

Para a aplicação do segundo método de ajustagem de Ziegler-Nichols, inicialmente é necessário manter as ações integral e derivativa inoperantes. Isso pode ser realizado selecionando-se $T_i = 0$ e $T_d = \infty$, mantendo, desta forma, somente a ação proporcional.

Aumenta-se, então, o ganho proporcional K_p até que a saída do sistema passe a apresentar uma oscilação sustentada pela primeira vez. O valor de K_p para o qual esse fenômeno ocorre é denominado ganho proporcional crítico (K_{cr}). A Figura 13 mostra uma situação onde ocorre uma oscilação sustentada.



*Figura 13 – Saída com oscilação sustentada
(extraída de OGATA, 2003)*

Se a saída não exibe essa oscilação para qualquer valor que K_p possa assumir, então este método não pode ser utilizado. Para a aplicação do método é necessário se determinar também qual o período das oscilações sustentadas (P_{cr}).

O Quadro 5 apresenta os valores dos parâmetros de um controlador PID sugeridos por Ziegler-Nichols, a partir da aplicação do segundo método de ajustagem, com base nos valores do ganho crítico (K_{cr}) e do período crítico (P_{cr}).

Quadro 5 – Parâmetros do controlador PID segundo a metodologia de Ziegler-Nichols (segundo método)

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	0,5 K_{cr}	∞	0
PI	0,45 K_{cr}	$P_{cr}/1,2$	0
PID	0,6 K_{cr}	0,5 P_{cr}	0,125 P_{cr}

O controlador PID obtido a partir da aplicação do segundo método de Ziegler-Nichols possui um pólo na origem ($s = 0$) e zeros duplos em $s = -4/P_{cr}$.

Os parâmetros do PID, obtidos através da metodologia proposta por Ziegler e Nichols para controladores PID, podem não gerar boas respostas e/ou não serem aplicáveis em determinados processos. Portanto, faz-se necessário um ajuste fino com a finalidade de encontrar um valor ótimo dos parâmetros que proporcionem uma resposta conjunta próxima a do modelo de referência desejado.

Para OGATA (2003), as regras de sintonia propostas por Ziegler e Nichols fornecem estimativas dos valores dos parâmetros do controlador PID que proporcionam um ponto de partida para a sintonia fina, e não os valores definitivos de K_p , K_i e K_d , logo na primeira tentativa.

Ziegler e Nichols foram os primeiros a apresentar métodos de sintonia de controladores PID extremamente simples e facilmente aplicáveis na indústria. Estes métodos devem ser encarados como uma forma sistemática de obter uma primeira aproximação (em geral bastante conservadora), a ser melhorada.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os principais materiais e as metodologias utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho. Os materiais utilizados foram cedidos pelo Laboratório de Instrumentação e Controle – LIC, com o apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP. A empresa Jumil – Máquinas e Implementos Agrícolas, fabricante do modelo que serviu de base para o desenvolvimento do equipamento de formulação, dosagem e aplicação, colaborou com o projeto, cedendo uma chassi de equipamento, com os dosadores e depósitos necessários, bem como, executou os serviços de adaptação mecânica.

A montagem eletrônica, integração dos componentes, desenvolvimento de aplicativos computacionais e testes do equipamento foram realizados no Laboratório de Instrumentação e Controle – LIC, da Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI / UNICAMP. Os testes do protótipo foram realizados no Laboratório de Protótipos da Faculdade de Engenharia Agrícola – FEAGRI / UNICAMP.

3.1 Material

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizados principalmente os seguintes materiais:

- **Equipamento para formulação, dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis:** utilizou-se o protótipo descrito por OLIVA et al. (2001) que é constituído pelos seguintes componentes principais:
 - **Chassi de semeadora adubadora:** chassi modificado de semeadora-adubadora, marca Jumil, modelo 2880, série Magnum, com quatro linhas de aplicação no sulco.

- **Válvulas proporcionais:** três válvulas proporcionais de vazão, compensadas a pressão, marca HydraForce, modelo PV7230A10TN24DG, vazão máxima de 64 litros por minuto, acionadas por bobinas eletromagnéticas de 12 V_{DC}.
 - **Componentes hidráulicos:** reservatórios de óleo hidráulico, manômetro de ponteiro, válvula de alívio, mangueiras, conexões, filtros, óleo, acoplamentos, etc.
 - **Amplificadores para acionamento das válvulas:** três amplificadores do tipo PWM³⁴, marca HydraForce, modelo 7114950, alimentação de 9 a 28 V_{DC}, sinal de comando em tensão (0 – 5V_{DC}) ou corrente (0 – 20 mA), saída PWM, ajuste de frequência, rampa de subida e descida.
 - **Motores hidráulicos:** três motores hidráulicos, marca Eaton, modelo CHAR-LYNN série 2000, tipo orbital³⁵, deslocamento volumétrico de 0,305 litro por revolução, rotação contínua máxima de 246 min⁻¹, rotação intermitente máxima de 365 min⁻¹.
 - **Bomba hidráulica:** Bomba de engrenagens, marca Comercial Hidráulica, modelo P11-23, deslocamento volumétrico de 0,023 litro por revolução.
- Sistema para geração e transmissão do sinal de correção diferencial em tempo real via rádio para GPS, constituído pelos seguintes equipamentos:
 - **Receptor GPS base:** receptor GPS marca Trimble, modelo AgGPS 122 Base, com as seguintes características principais: 12 canais paralelos, precisão sub-métrica, taxa de aquisição de posição de até 10 pontos por segundo, com capacidade de gerar sinal para correção diferencial no padrão RTCM-SC³⁶ 104,

³⁴ PWM: *Pulse Width Modulation*.

³⁵ Tipo de motor hidráulico que tem como principal característica uma operação adequada mesmo em baixas rotações e até mesmo com carga variável.

³⁶ RTCM-SC: *Radio Technical Commission for Maritime Services - Special Committee*.

receptor e antenas selados, processamento de informações em tempo real, duas portas padrão RS-232C³⁷.

- **Rádio transmissor fixo:** constituído por um modulador de sinais acoplado a um transmissor de rádio, marca Trimble, modelo Trimmark II Base / Repeater, com potência de 25 watts, frequência de transmissão UHF³⁸, alcance de até 15 quilômetros (segundo dados do fabricante), com antena externa.
- Sistema móvel para recepção de sinal de GPS com correção diferencial em tempo real via rádio, composto basicamente dos seguintes equipamentos:
 - **Rádio receptor móvel:** constituído por um receptor móvel de rádio acoplado a um demodulador de sinais, marca Trimble, modelo Trimmark II Rover, frequência de recepção UHF, com antena externa.
 - **Receptor GPS móvel:** receptor GPS marca Trimble, modelo AgGPS 132, com as seguintes características principais: 12 canais paralelos, precisão submétrica, taxa de aquisição de posição de até 10 pontos por segundo, capacidade para recepção de sinais de correção diferencial no padrão RTCM-SC 104, receptor e antena selados, processamento de informações em tempo real, duas portas padrão RS-232C.
- **Microcomputador para controle do equipamento:** microcomputador portátil, tipo *notebook*, marca Toshiba, modelo 4020 CDT, processador Pentium II, frequência de *clock* de 300 MHz, 64 MB de memória RAM, tela de matriz ativa, duas interfaces padrão PCMCIA, uma interface serial RS-232C, uma interface paralela.

³⁷ RS-232C: *Recommended Standard-232C* – Interface padrão, aprovada pela Electronic Industries Alliance (EIA), para a conexão de dispositivos seriais.

³⁸ UHF: *Ultrahigh Frequency* – Compreende a faixa de frequências de 300 MHz a 3 GHz.

- **Cartões de entrada e saída de sinais:** dois cartões padrão PCMCIA de entradas e saídas analógicas e digitais, marca National Instruments, modelo DAQCard 1200, cada um com oito entradas e duas saídas analógicas de 12 bits, frequência máxima de aquisição 100 kHz.
- **Sistema de aquisição de dados:** sistema de medição de sinais, marca HBM, modelo MGCplus, com processamento digital interno, 16 entradas para diversos tipos de sensores e sinais, *display* gráfico multifunção, disco rígido interno para armazenamento temporário dos dados padrão PCMCIA, conversores analógicos/digitais com resolução de 20 bits, máxima taxa de amostragem de 9600 amostras por segundo para cada canal, filtros digitais incorporados, interfaces do tipo serial (RS-232C) e paralela, alimentação 12 V_{DC}.
- **Sensor de temperatura:** Detector Resistivo de Temperatura (RTD³⁹), do tipo Pt-100, Classe de precisão B, ligado a três fios.
- **Conversor de frequência:** conversor de frequência para motores trifásicos, marca ABB, modelo ACS 601, potência máxima de acionamento de 7,35 kW, tensão de trabalho de 380 V_{AC}.
- **Motor elétrico:** motor elétrico trifásico, marca WEG, tipo “gaiola de esquilo”, com potência nominal de 7,35 kW, rotação nominal de 1760 min⁻¹, tensão de operação 220/380Vac, rendimento nominal de 85 %, fator de potência de 0,84, frequência de 60 Hz.
- **Sensor de rotação:** gerador de pulsos (*encoder*), do tipo incremental bidirecional, marca Vedder Root, modelo BA, 500 pulsos por rotação, com indicação de sentido, saída de sinal em nível TTL⁴⁰, alimentação de 5 V_{DC}.
- **Planilha eletrônica para processamento dos dados:** planilha Excel, versão 2000, desenvolvida pela Microsoft.

³⁹ RTD: *Resistance Temperature Detector*.

⁴⁰ TTL: *Transistor Transistor Logic*.

- **Aplicativo para processamento dos dados:** Matlab, versão 6.0, desenvolvido por The MathWorks, Inc.
- **Ambiente para desenvolvimento de aplicativos de aquisição de dados e controle:** LabVIEW, versão 5.1, desenvolvido por National Instruments Corporation.
- **Aplicativo para aquisição de dados:** Catman, versão 2.1, desenvolvido por HBM.

3.2 Métodos

A parte inicial do trabalho consistiu de um estudo sobre o funcionamento do sistema mecânico e hidráulico do equipamento, visando o projeto e a construção de um sistema de controle eletrônico. Primeiramente foram realizados estudos com a finalidade de adequar os diversos componentes eletro-eletrônicos para uma operação conjunta. Nessa etapa foram estudados protocolos de comunicação, sinais e interfaces e aplicativos computacionais. A seguir, foram definidos os objetivos do sistema de controle, limites operacionais do equipamento e procedimentos para a correta operação do sistema como um todo. Nessa etapa também foram estabelecidas a forma de implementação do sistema de controle do equipamento e sua plataforma computacional. Finalmente foram definidas as metodologias de teste e avaliação do equipamento.

3.2.1 Modificações no chassi de semeadora-adubadora convencional

Como ponto de partida deste trabalho utilizou-se o protótipo de um equipamento para aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis, cujo projeto mecânico foi desenvolvido por OLIVA et al. (2001). O protótipo do equipamento consistia basicamente de componentes mecânicos e hidráulicos, não possuindo dispositivos eletrônicos de acionamento e controle. A Figura 14 mostra uma visão do equipamento utilizado como base deste trabalho.



Figura 14 – Equipamento para formulação, dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis

O modelo original utilizado como base foi uma semeadora-adubadora, com capacidade para oito linhas de aplicação. O equipamento original possui um sistema de distribuição de adubo que utiliza dosadores tipo helicoidal flutuante e unidades de distribuição de adubo de discos duplos desencontrados. Rodas compactadoras flutuantes fazem a cobertura das sementes, enquanto controladores de profundidade, flutuantes e independentes, controlam a profundidade de aplicação. O equipamento, em sua configuração original possui, ainda, um sistema pneumático de distribuição de sementes, acionado pela tomada de potência do trator e um sistema de acionamento dos eixos dos distribuidores realizado por rodas de terra e câmbio mecânico para regulação das respectivas rotações.

As adaptações consistiram em mudanças em diversas partes do equipamento. Foi aproveitada somente a parte referente à aplicação de adubo, sendo retirada as referentes à aplicação de sementes. O sistema mecânico de acionamento e transmissão foi substituído por

um sistema hidráulico, com controle de vazão por meio de válvulas proporcionais controladas eletricamente.

3.2.2 Descrição do sistema hidráulico

Em face da ordem de grandeza da potência necessária para acionar todos os dosadores o protótipo da máquina possui um sistema hidráulico de acionamento. Um requisito essencial é que o sistema hidráulico seja acionado a partir da tomada de potência (TDP) de tratores agrícolas, cuja rotação nominal pode ser de 540 min^{-1} ou 1000 min^{-1} . Para tanto, na utilização em campo do equipamento, deve ser utilizada uma caixa multiplicadora, de engrenagens, com relação de multiplicação adequada, de modo a permitir o acionamento da bomba hidráulica à rotação de aproximadamente 1800 min^{-1} .

O esquema hidráulico do sistema de acionamento do equipamento de dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos no sulco, a taxa variável, está apresentado na Figura 15.

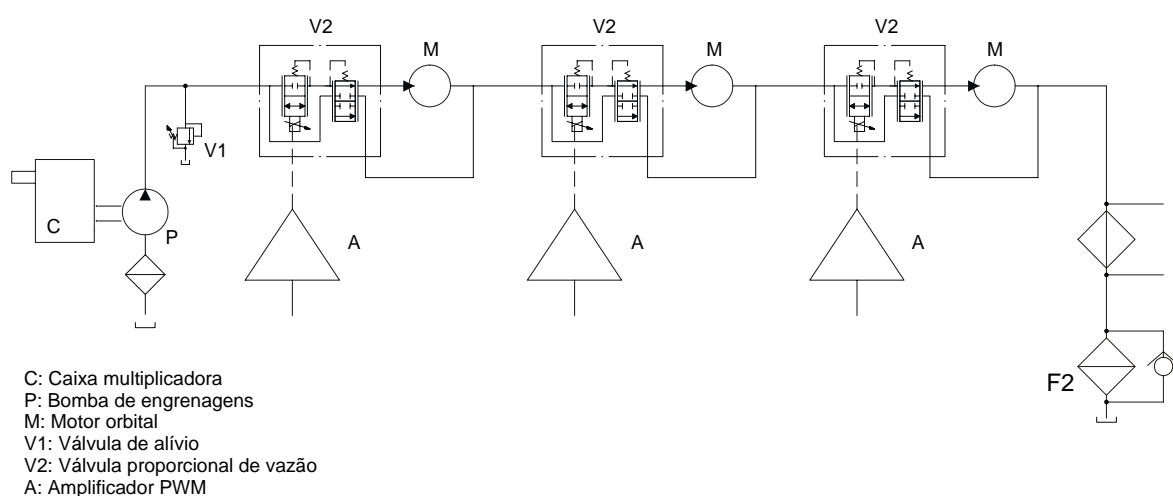


Figura 15 – Diagrama esquemático do sistema hidráulico do equipamento

O sistema, em sua versão final, é composto de uma bomba hidráulica de engrenagens, acoplada através de uma caixa multiplicadora de velocidades ao eixo da tomada de potência do trator agrícola, fornecendo pressão e fluxo hidráulico para todo o sistema. Três motores

hidráulicos, do tipo orbital, acionam diretamente cada um dos eixos que comandam cada conjunto de quatro dosadores. As rotações de cada motor são controladas individualmente através de três válvulas proporcionais compensadas à pressão. Também fazem parte do circuito uma válvula limitadora de pressão (ajustada para 90 bar), reservatórios de óleo hidráulico, além de mangueiras e conexões hidráulicas.

Adotou-se uma configuração que procura aproveitar melhor a potência disponível no sistema de acionamento, realizado por meio de motores hidráulicos, fazendo com que cada um dos motores acione um conjunto de quatro dosadores. Portanto, o protótipo do equipamento de aplicação de fertilizantes sólidos, a taxas variáveis, tem quatro linhas de aplicação. A Figura 16 mostra um diagrama esquemático do sistema de acionamento dos dosadores.

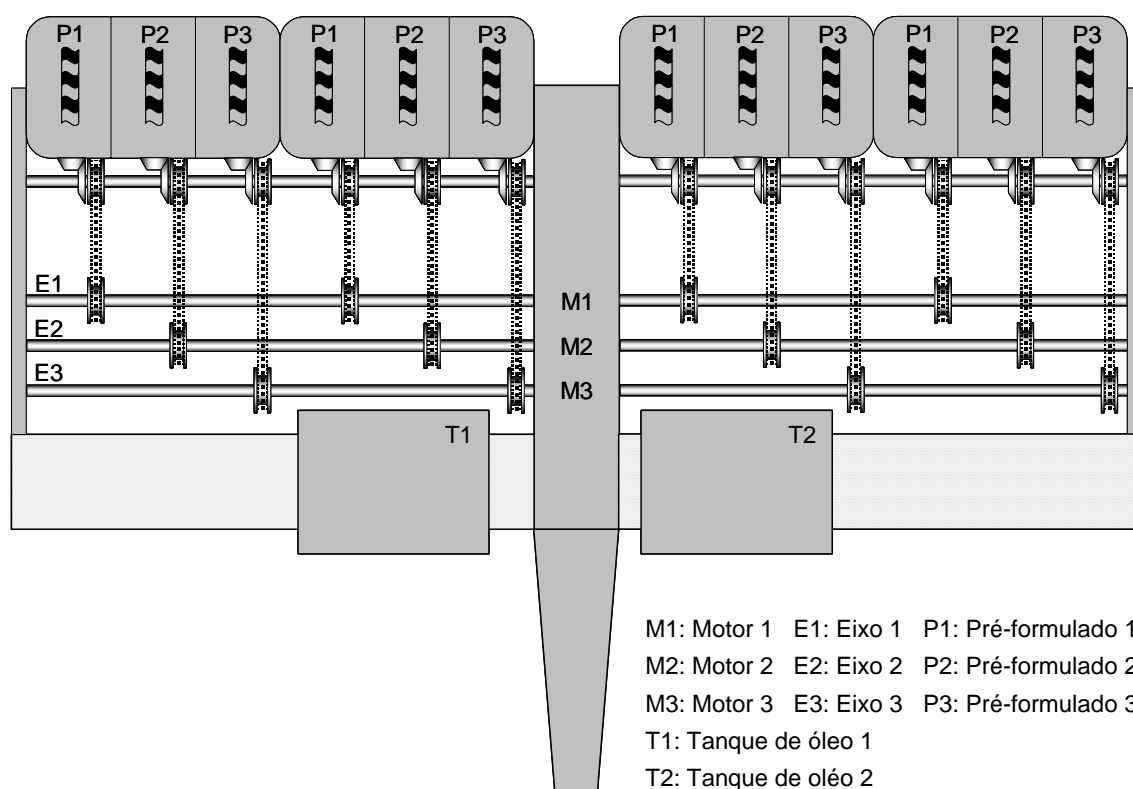


Figura 16 – Diagrama esquemático do sistema de acionamento dos dosadores

Para o controle do fluxo hidráulico dos motores foram empregadas válvulas proporcionais de controle de fluxo (uma para cada motor), comandadas por bobinas

eletromagnéticas. As válvulas têm compensação do fluxo quanto a variações de pressão e possuem três portas: entrada, saída e “bypass”.

As válvulas foram montadas diretamente no chassi do equipamento. A Figura 17 mostra a montagem das três válvulas no equipamento, em sua parte frontal, podendo-se observar, na parte inferior de cada uma delas, o correspondente amplificador PWM.

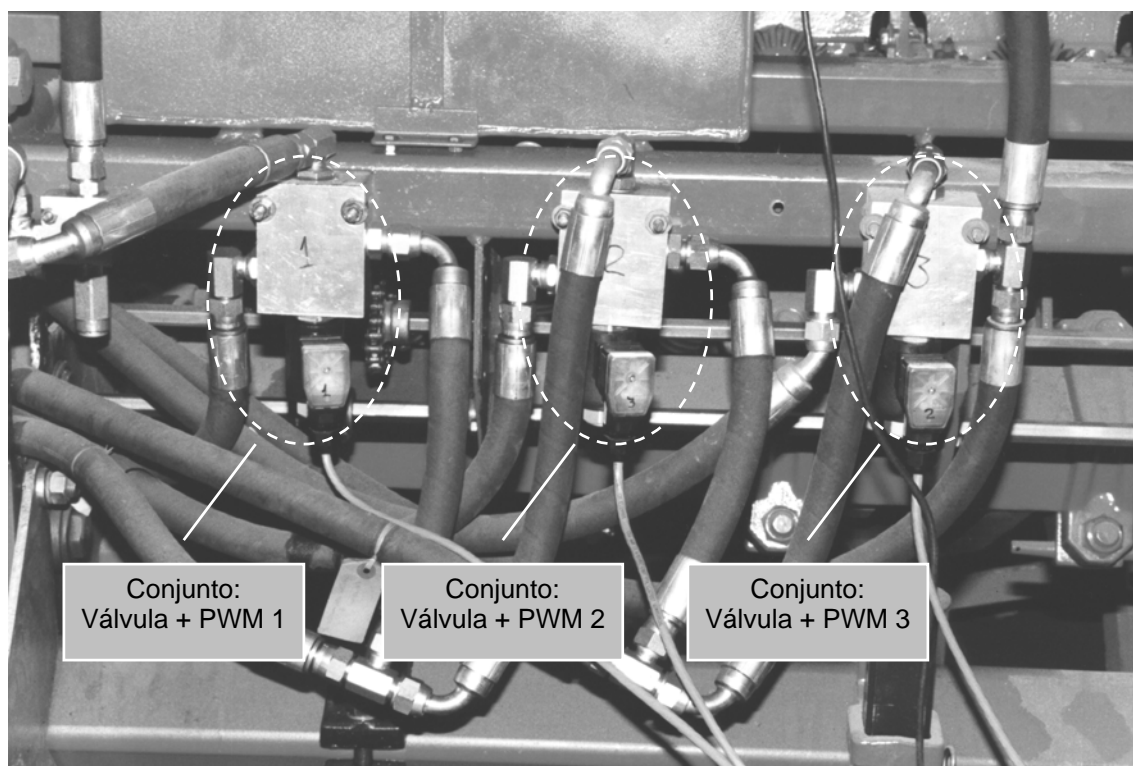


Figura 17 – Montagem das válvulas proporcionais no equipamento

A opção pela montagem do conjunto válvulas e amplificadores PWM diretamente no corpo do equipamento facilitou sobremaneira a montagem e manutenção e, ainda, permitiu uma melhor refrigeração das válvulas durante a operação.

3.2.3 Modificações no sistema mecânico

O sistema de acionamento dos dosadores do equipamento foi alterado para operar de modo independente para cada produto. Inicialmente o equipamento possuía um único eixo para acionamento de todos os dosadores. Com as alterações realizadas o equipamento passou a

ter três eixos de acionamento dos dosadores, um para cada produto aplicado, como pode ser visualizado na Figura 18.

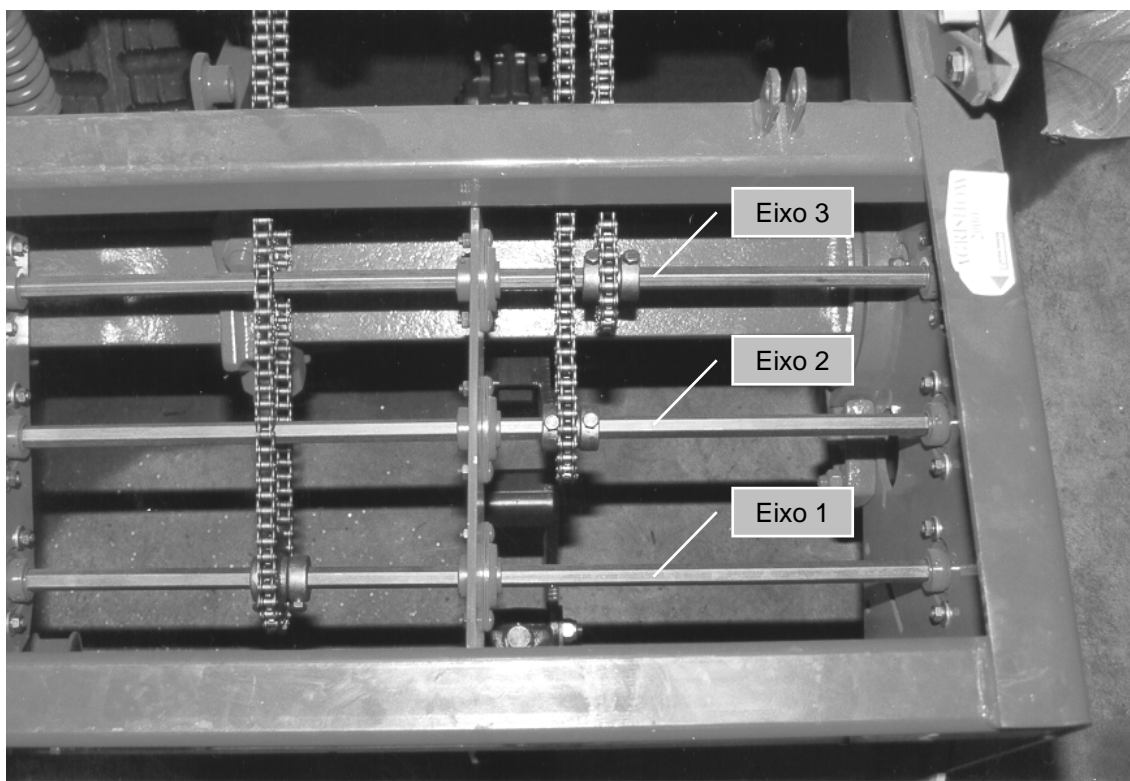


Figura 18 – Eixos de acionamento dos dosadores

O sistema de acionamento original dos eixos, constituído por duas rodas de contato com o solo e por dois conjuntos de engrenagens para regulação da quantidade de produto a ser aplicada, foi retirado. Em seu lugar se instalaram três motores hidráulicos, um para cada eixo. Os acoplamentos entre os motores e os eixos foram feitos por meio de engrenagens dentadas e correntes, com relações de transmissões de 1:1 (Figura 19).



Figura 19 – Acoplamento dos motores hidráulicos com os eixos de acionamento dos dosadores

No equipamento é utilizado um acoplamento por engrenagens dentadas e correntes entre os eixos de acionamento e os pinhões dos dosadores, como observado na Figura 20. Neste acoplamento a relação de transmissão também é de 1:1. Foi mantida a relação de transmissão original entre o pinhão e a coroa dos dosadores de 16:20. A relação total de transmissão entre os eixos dos motores hidráulicos e os eixos do dosador helicoidal foi, portanto, de 16:20, ou seja, a cada 20 voltas do eixo do motor, o eixo do dosador realiza 16 giros.

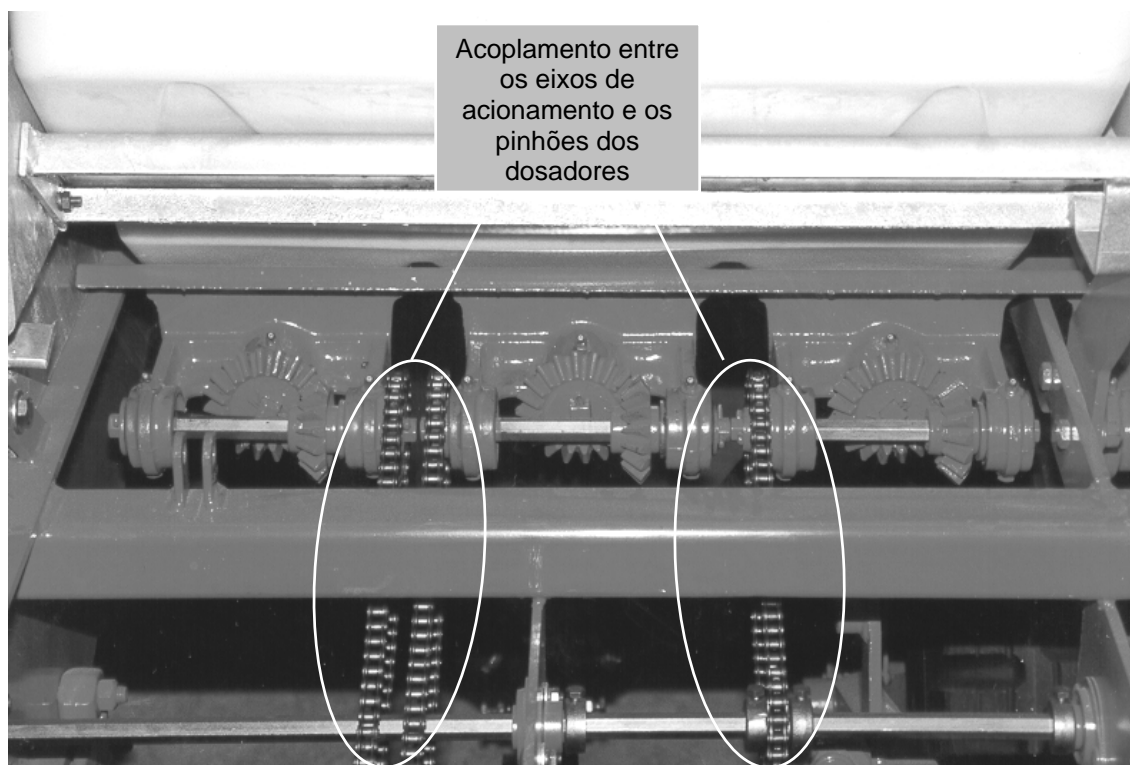


Figura 20 – Acoplamento entre os eixos de acionamento e os pinhões dos dosadores

As caixas de fertilizantes foram subdivididas a fim de armazenarem três produtos distintos (Figura 21). Portanto, cada linha de aplicação ficou sendo alimentada por um depósito subdividido em três partes.

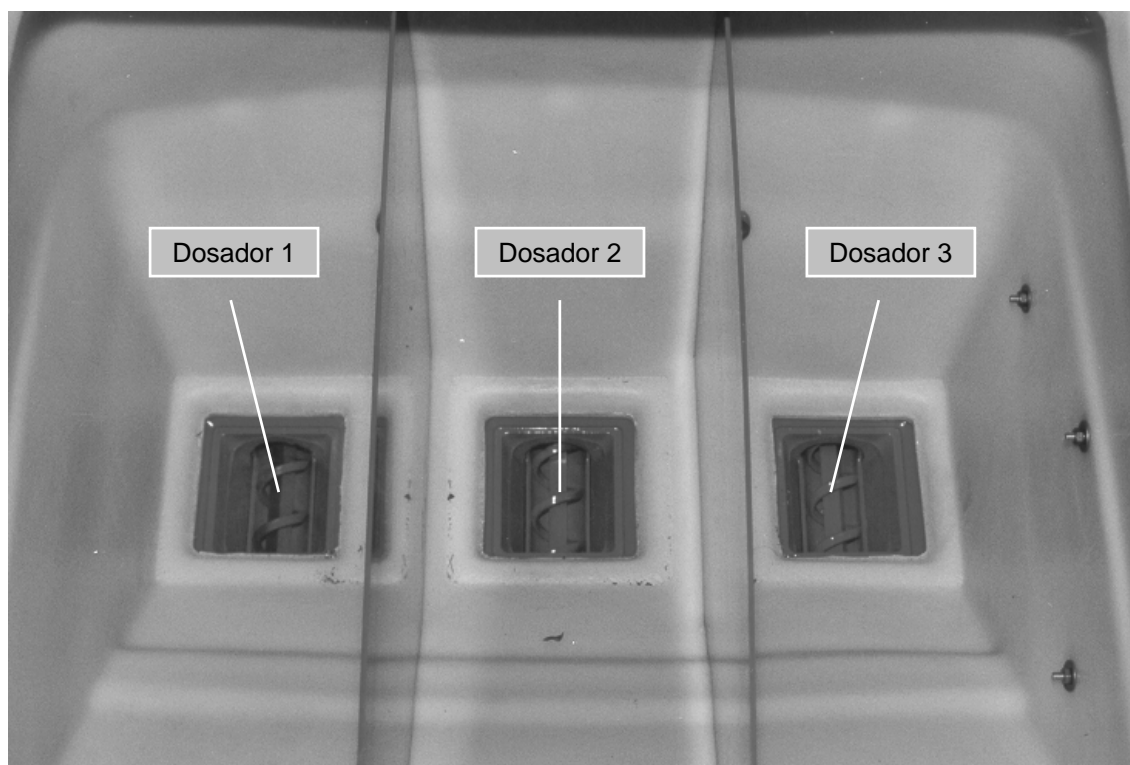


Figura 21 – Depósito de fertilizante subdividido em três partes, mostrando ao fundo os dosadores helicoidais

Cada linha de aplicação foi modificada de modo a contar com três dosadores helicoidais, um para cada produto. Em cada uma das linhas de aplicação os fertilizantes dosados passaram a ser conduzidos por dutos flexíveis até uma junção pela qual, após serem misturados, são conduzidos até o sulco formado pelos discos de abertura (Figura 22).

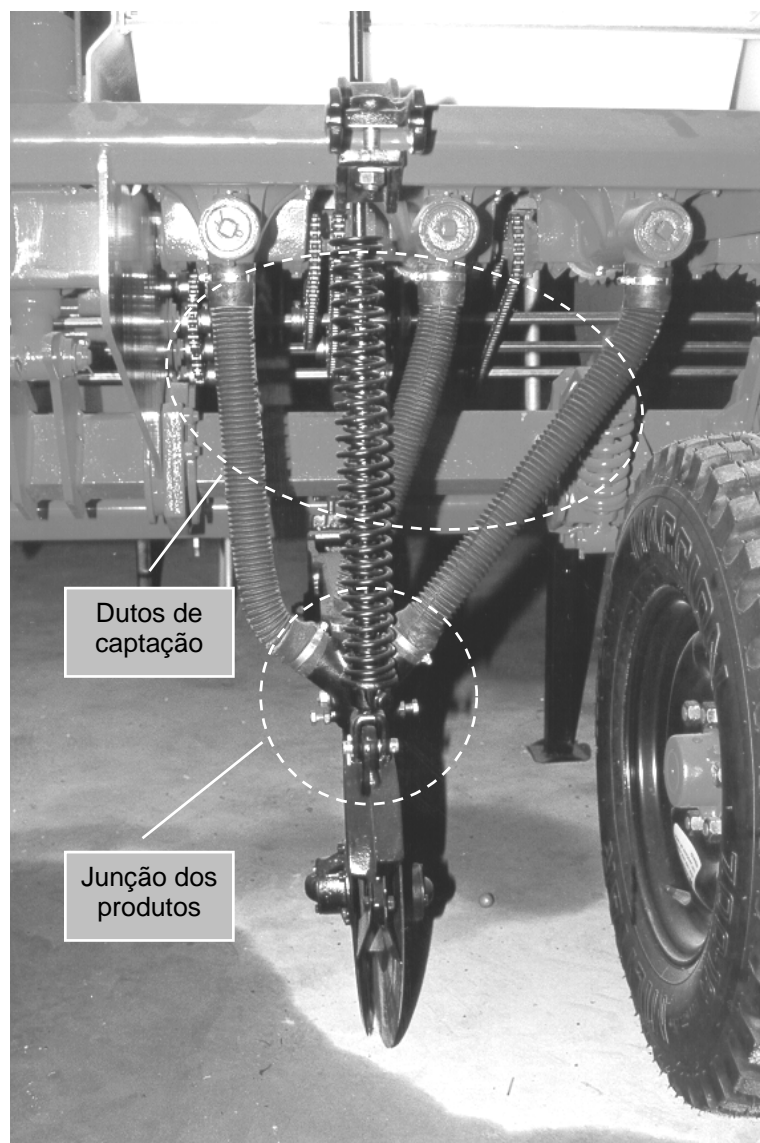


Figura 22 – Dutos de captação e junção dos produtos dosados em uma linha de aplicação

3.2.4 Sistema de aquisição de dados e processamento de sinais

Para a medição e o registro do comportamento do equipamento, utilizou-se o sistema de instrumentação de aquisição de dados MGCplus. O sistema MGCplus é constituído de uma unidade de processamento, contendo uma interface com o usuário, placas de amplificação e condicionamento de sinais, além de uma fonte de alimentação de corrente contínua. O sistema

é montado em um *rack* padrão de 19 polegadas e o armazenamento de dados pode ser realizado em um computador conectado, através de uma porta paralela, ao equipamento, ou ainda, diretamente em uma unidade de disco rígido removível, padrão PCMCIA. Cada um dos cartões de amplificação possui um conversor analógico / digital (A/D) de 20 bits, com capacidade de aquisição de até 9600 amostras por segundo. Os condicionadores podem incorporar filtros digitais do tipo passa baixa, passa banda e passa alta.

O sistema de aquisição e processamento de sinais foi configurado para medir, processar e armazenar os sinais de comando de cada um dos amplificadores PWM de acionamento das válvulas, o sinal de comando para o motor elétrico para acionamento da bomba hidráulica, a rotação dos eixos de acionamento dos dosadores e ainda, a temperatura ambiente e a temperatura do óleo hidráulico. A Figura 23 mostra o esquema de ligação, na forma de diagrama de blocos, do sistema de aquisição de dados e processamento de sinais.

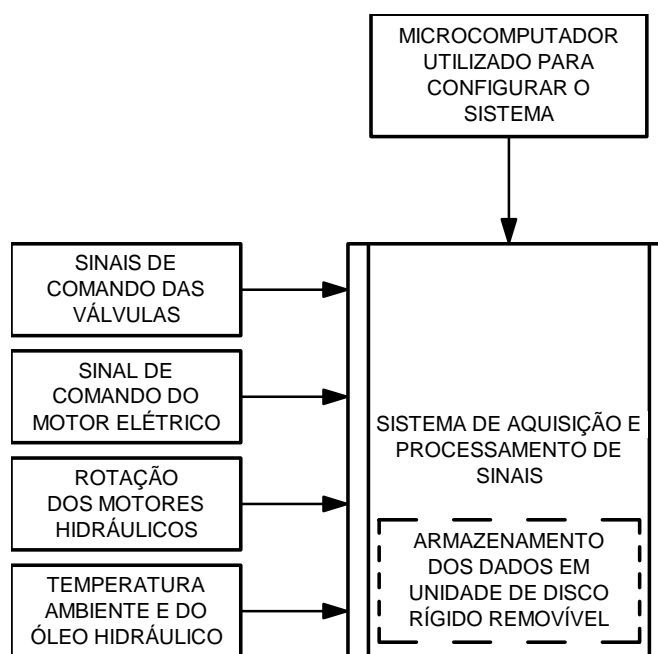


Figura 23 – Diagrama de blocos da ligação do sistema de aquisição de dados e processamento de sinais

Juntamente com o sistema de aquisição e processamento de sinais foi instalado o microcomputador portátil (Figura 24). Os sinais de comando dos amplificadores PWM das válvulas de controle de fluxo e o sinal de comando da rotação do motor elétrico foram gerados

pelos cartões DAQ Card 1200 instalados no microcomputador portátil. O sistema de aquisição de dados e processamento de sinais foi configurado para receber os sinais de controle dos amplificadores das válvulas e do motor elétrico através de uma placa de conexão, modelo AP-01, com conector DB-15D para ligação dos sinais. Para a amplificação e digitalização dos sinais utilizou-se uma placa modelo ML-01, com amplificação DC⁴¹, indicada para leitura de sinais de tensão, corrente, e termopares.

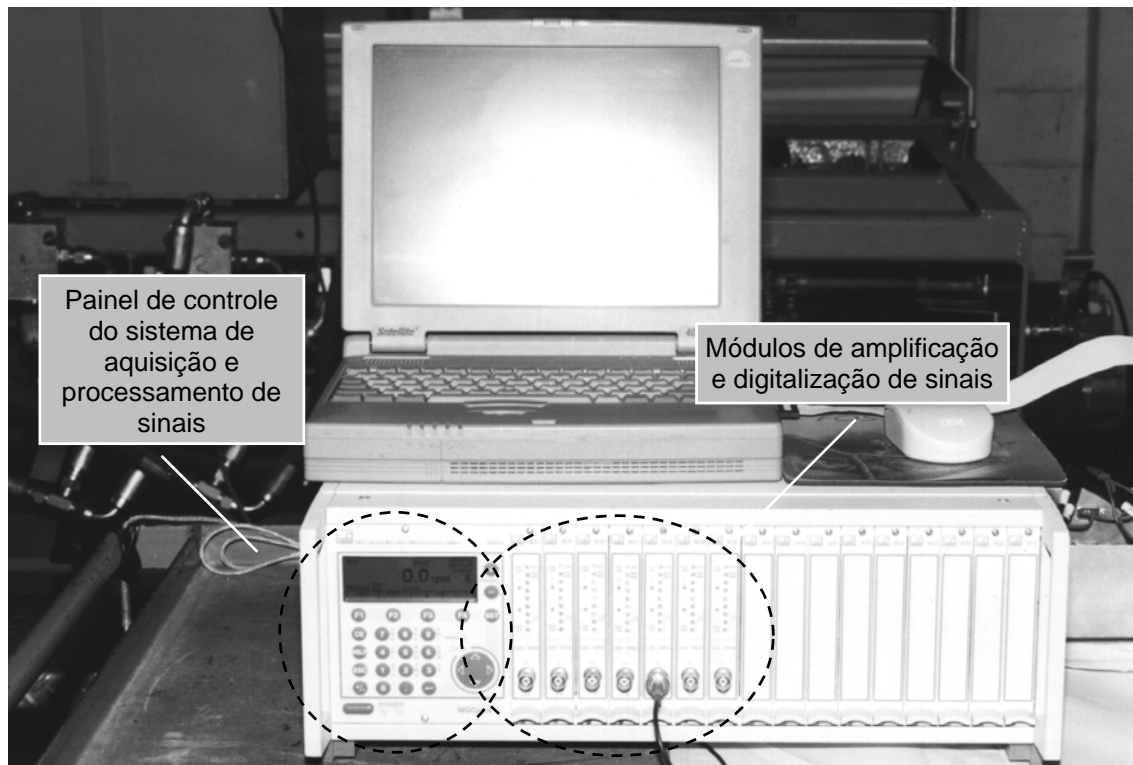


Figura 24 – Computador portátil e sistema de aquisição e processamento de sinais MGCplus

Para a implementação do sistema de controle de rotação dos motores hidráulicos foi necessária a medição da rotação dos mesmos. Para tanto, utilizou-se um sensor de rotação do tipo gerador de pulsos incremental bidirecional (Figura 25), com resolução de 500 pulsos por rotação, instalado na extremidade do eixo de acionamento dos dosadores. Como a relação de transmissão dos motores hidráulicos para os eixos de acionamento dos dosadores é direta

⁴¹ DC: *Direct Current*.

(1:1), optou-se pela instalação dos sensores de rotação diretamente nos eixos de acionamento dos dosadores. As extremidades dos eixos de acionamento dos dosadores foram adaptadas de forma a poderem se encaixar no sensor de rotação. O sistema de aquisição de dados e processamento de sinais recebe os pulsos gerados pelo sensor de rotação através de um conector DB-15D de uma placa de conexão, modelo AP-01. Para o condicionamento e digitalização dos sinais utilizou-se uma placa modelo ML-60, indicada para sensores que operam com sinais em frequência.

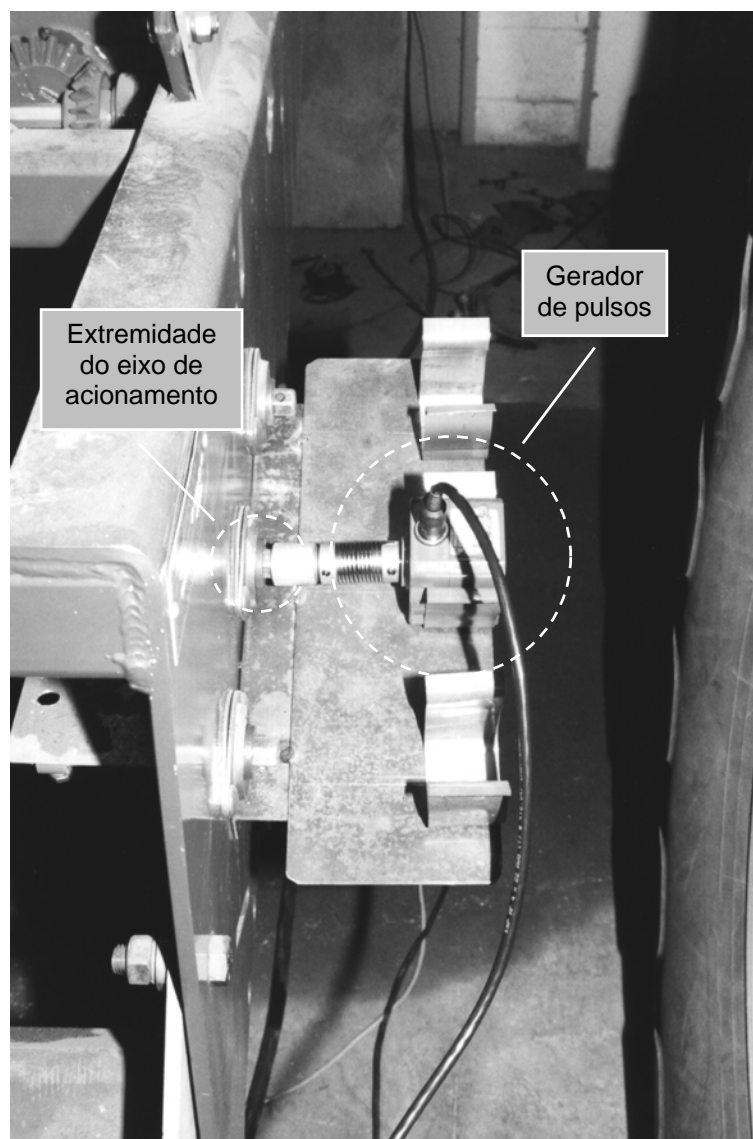


Figura 25 – Instalação do sensor de rotação

A saída do sensor de rotação é do tipo NPN⁴², necessitando, portanto da ligação de um resistor de carga ao positivo da alimentação (+12 V_{DC}). A Figura 26 mostra o esquema elétrico de ligação do sensor de rotação. O sinal gerado possui uma amplitude que varia de zero a aproximadamente 12 V_{DC}, e sua frequência é proporcional à rotação do seu eixo.

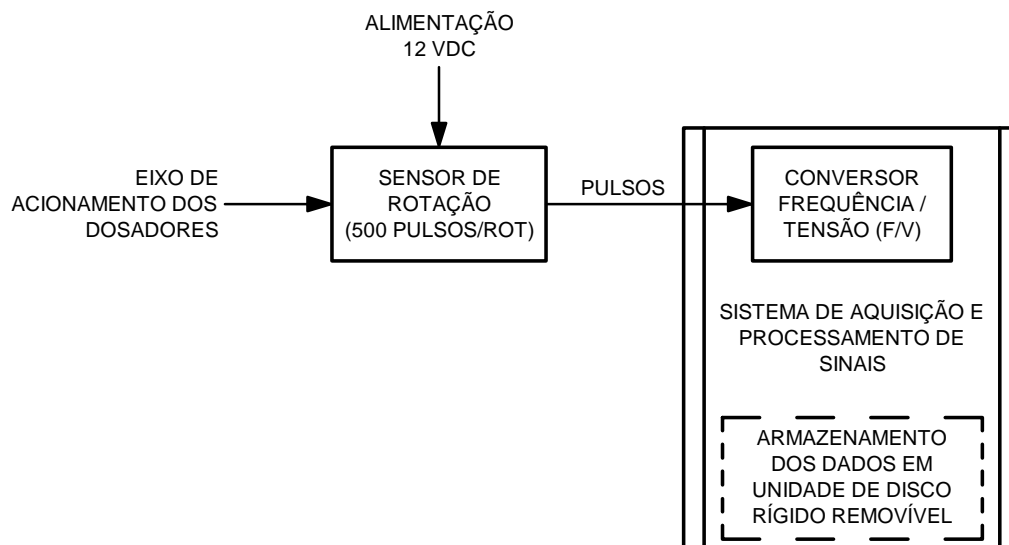


Figura 26 – Esquema de ligação do sensor de rotação do eixo de acionamento

A frequência do sinal gerado pelo sensor de rotação em função da rotação do eixo de acionamento dos dosadores, obedece a relação dada pela Equação 5.

$$F = 8,333 \cdot N \quad \text{Equação 5}$$

⁴² A terminologia NPN se refere ao modo de ligação do sensor. Neste caso a saída do sinal é na forma “coletor aberto” e uma carga deve ser ligada entre a saída do sinal e o positivo da alimentação do sensor.

Onde:

F: Frequência do sinal gerado pelo sensor de rotação em hertz.

N: Rotação do eixo de acionamento dos dosadores em min^{-1} .

Utilizou-se um conversor frequência / tensão (F/V) do próprio sistema de aquisição de dados e processamento de sinais para transformar a informação de rotação, de frequência para uma tensão analógica na faixa de 0 a 5 V_{DC}. Ajustou-se o conversor F/V de forma que com o sensor parado a tensão gerada fosse nula e que com o sensor girando a 100 min^{-1} a tensão fosse de 5 V_{DC}. Desta forma a Equação 6 expressa a relação entre a rotação do eixo de acionamento dos dosadores e o sinal correspondente em tensão.

$$V = 0,05 \cdot N \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

V: Tensão correspondente à rotação do eixo de acionamento dos dosadores.

N: Rotação do eixo de acionamento dos dosadores em min^{-1} .

O sinal de tensão referente ao sensor de rotação foi aplicado a uma das entradas analógicas de um dos cartões DAQCard 1200. Este sinal foi utilizado para se estabelecer a realimentação de saída necessária para o funcionamento do controlador de rotação.

Neste trabalho, avaliou-se comportamento do controlador de rotação em cada um dos eixos, de forma individual. Nos testes, o sensor de rotação foi posicionado na extremidade do eixo cuja rotação seria medida e controlada.

Para a medição da temperatura ambiente e do óleo hidráulico foram empregados sensores de temperatura do tipo Detector Resistivo de Temperatura (RTD), com elemento sensor de platina (Pt-100), classe de precisão B, ligado a três fios. Os sensores de temperatura foram ligados diretamente ao conector DB-15D de uma placa de conexão modelo AP-01. Para o condicionamento e digitalização dos sinais utilizou-se uma placa modelo ML-35, indicada

para sensores de temperatura do tipo Pt-100 e Pt-1000. A placa ML-35 realiza internamente a linearização necessária do sinal do sensor de temperatura.

O sistema de aquisição e processamento de sinais operou com uma taxa de aquisição de dados de 100 pontos por segundo, para cada um dos canais de medição utilizados. Para a avaliação de grandezas físicas e mecânicas de interesse, relativas ao equipamento desenvolvido, a taxa utilizada pode ser considerada bastante aceitável.

Os dados dos testes foram gravados na forma de arquivos eletrônicos em um dispositivo do tipo unidade de disco removível, padrão PCMCIA, com capacidade de 350 MB. Os arquivos foram transformados, do formato proprietário do sistema de aquisição e processamento para um formato texto, com o uso do aplicativo Catman, versão 2.1.

Utilizou-se o aplicativo Matlab para geração dos arquivos com os sinais de excitação que foram utilizados pelos sistemas de controle do equipamento. O Matlab também foi utilizado para processamento das informações colhidas durante os testes do equipamento.

A planilha de cálculo Excel foi utilizada para o processamento dos dados, através da realização de conversões, eliminação de trechos indesejáveis dos sinais coletados durante os testes, e também para a confecção de gráficos para análise.

3.2.5 Sistema de posicionamento global – GPS

Para aplicações de insumos a taxas variáveis é recomendado a utilização de um sistema de posicionamento com precisão sub-métrica. Ressalta-se ainda que, no caso de uso de um sistema com correção diferencial, é imprescindível que a mesma seja em tempo real, pois o equipamento de aplicação localizada estudado baseia-se nas informações de posicionamento para formular, dosar e aplicar adequadamente os fertilizantes. Neste trabalho foi utilizado um GPS com correção diferencial, em tempo real, através de transmissão de dados por rádio-frequência.

O sistema utilizado possui uma estação de correção fixa que é constituída por um GPS base e um rádio transmissor fixo. O receptor GPS base, modelo AgGPS 122, gera um sinal de correção a partir da informação de sua posição geo-referenciada e das informações de

pseudodistância recebidas dos satélites. Esse sinal, no padrão RS-232C é enviado ao modem e rádio transmissor Trimmark II Base / Repeater que transmite o sinal de correção por rádio frequência na faixa de UHF. Os equipamentos utilizados permitem enviar o sinal de correção a uma taxa de 10 pontos por segundo, porém, nos testes foram utilizados com uma taxa de um ponto por segundo. A Figura 27 ilustra o esquema de ligação dos equipamentos da estação base de correção diferencial.

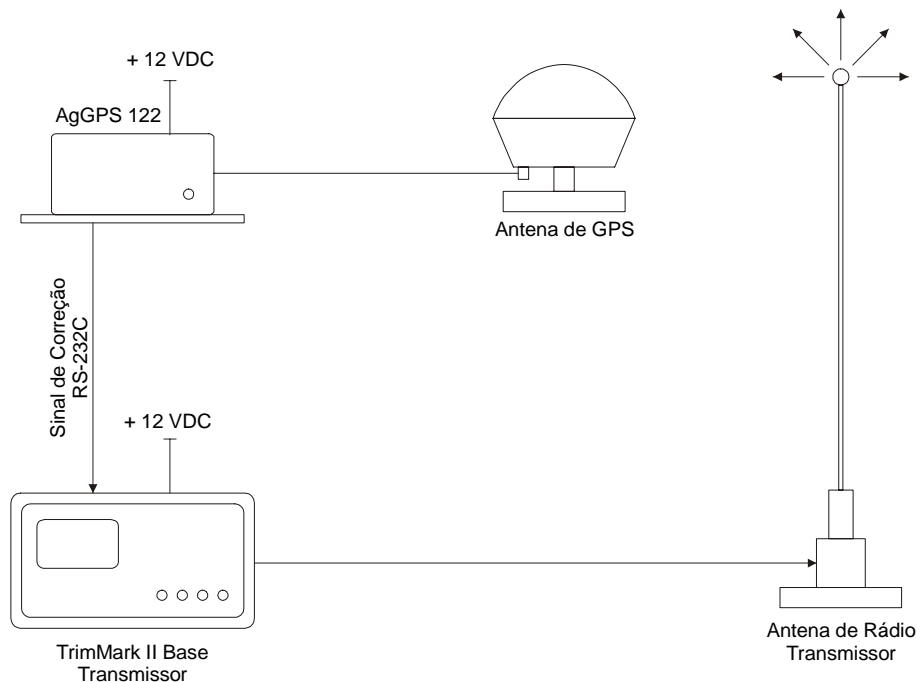


Figura 27 – Esquema de ligação dos equipamentos da estação base de correção diferencial, em tempo real, para GPS

Para a realização dos testes, os equipamentos da estação base foram instalados em um local fixo e geo-referenciado localizado no Campus da UNICAMP (Figura 28). Utilizou-se um dos marcos da Rede de Referência da UNICAMP para o posicionamento da estação base. O alcance máximo observado do sistema de correção foi de aproximadamente 10 quilômetros (em visada direta). Assim, foi possível se obter uma correção diferencial de posição, em um raio de aproximadamente 10 quilômetros da estação base fixa, distância suficiente para os objetivos do trabalho.

Os equipamentos da estação base de correção diferencial operam com tensão de alimentação de 12 V_{DC}. Apenas o computador portátil é alimentado por baterias próprias ou

pela rede elétrica. Ressalta-se, porém que a sua utilização é necessária somente no momento da configuração do GPS com a posição geo-referenciada da estação. Outro cuidado é em relação ao alto consumo do transmissor de rádio frequência, exigindo o uso de baterias de alta capacidade para se garantir autonomia suficiente para sua operação.

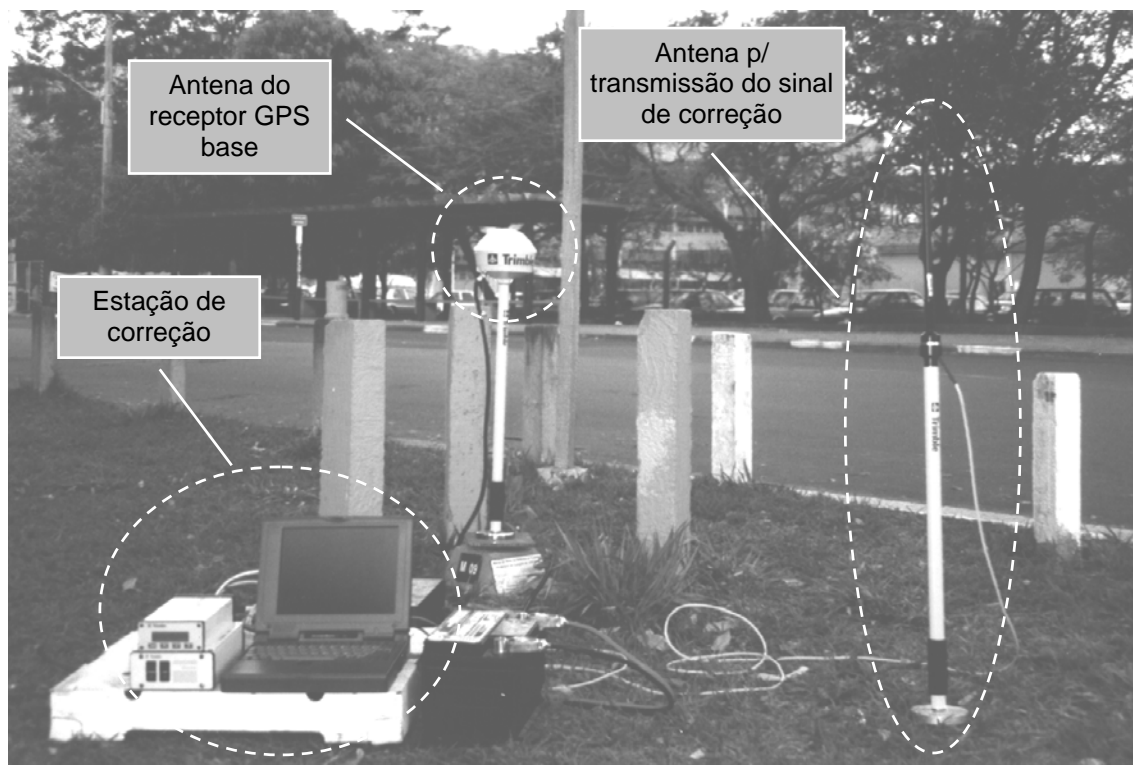


Figura 28 – Local de instalação da estação de correção diferencial, em tempo real, para GPS

No Laboratório de Instrumentação e Controle – LIC, foi instalado o rádio receptor móvel Trimmark Rover e o receptor GPS AgGPS 132. O rádio receptor móvel recebe o sinal de correção diferencial proveniente da estação fixa, enviando-o ao receptor de GPS. O receptor de GPS processa o sinal de correção, juntamente com a posição atual, fornecendo então, dados de posição geo-referenciados. A Figura 29 descreve o esquema de ligação dos dispositivos do sistema de GPS com correção diferencial em tempo real.

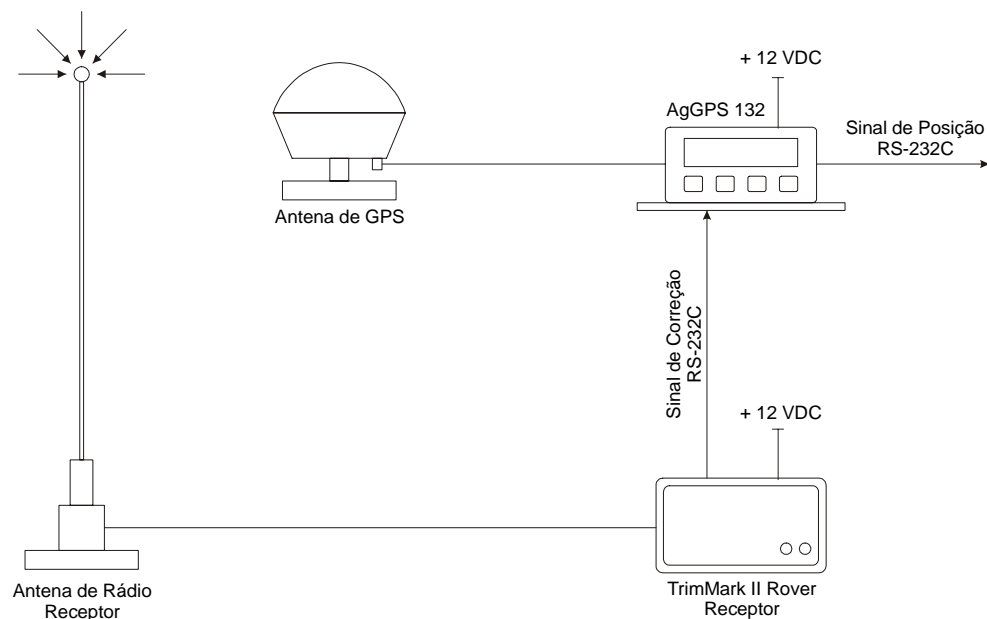


Figura 29 – Esquema do GPS móvel, com correção diferencial em tempo real

Todos os equipamentos do GPS com correção diferencial são alimentados com uma tensão de 12 V_{DC} e, portanto podem facilmente serem instalados em um trator agrícola, permitindo uma operação em campo.

3.2.6 Aplicativo para o controle do equipamento

Optou-se por uma implementação do controlador utilizando-se um sistema computacional com um aplicativo apropriado. Uma alternativa seria a implementação do controlador utilizando-se somente componentes eletrônicos, sem a utilização de sistemas e aplicativos computacionais. Porém, o uso de um controlador baseado em uma solução computacional traz grandes vantagens: possibilita uma grande flexibilidade na escolha de sua estrutura, facilidade no ajuste, interface amigável com o usuário, entre outras, quando comparado com um controlador implementado com componentes eletrônicos. Sua principal desvantagem é o seu alto custo, já que necessita do uso de uma plataforma computacional relativamente poderosa.

Utilizou-se o ambiente de desenvolvimento LabVIEW para a implementação do sistema de controle do equipamento. Foram desenvolvidas rotinas para: leitura da posição e velocidade de deslocamento do equipamento a partir de informações do GPS, controle da rotação dos motores hidráulicos, e controle geral do equipamento.

Para o controle do equipamento é necessária a leitura da posição geo-referenciada, a velocidade de deslocamento do mesmo, a leitura dos mapas de aplicação, cálculos das rotações dos eixos e atuação nos motores. Foram desenvolvidos aplicativos computacionais específicos, utilizando-se a mesma plataforma computacional dos controladores de rotação dos motores.

3.2.7 Interpretação das sentenças NMEA

Para interpretação da informação do posicionamento do equipamento, gerado pelo GPS, utilizou-se as sentenças no formato NMEA. Existem diversos tipos de sentenças NMEA, sendo que cada uma delas fornece informações diferentes sobre o sistema de posicionamento.

No sistema desenvolvido, foram empregadas as sentenças GLL⁴³ e VTG⁴⁴ que fornecem informações de posição, velocidade de deslocamento, qualidade do sinal, modo diferencial ou autônomo. A sentença do tipo GLL contém informações de hora, latitude e longitude (no formato decimal), além de outras informações sobre o funcionamento do sistema. A sentença VTG contém informações sobre a velocidade terrestre.

A sentença GLL é composta de sete campos mais um campo de *checksum* e fornece informações sobre a posição geo-referenciada e a hora universal na coordenada do receptor GPS. A estrutura da sentença GLL é mostrada no Quadro 6.

⁴³ GLL: *Geographic position, Latitude and Longitude.*

⁴⁴ VTG: *Track made good and ground speed.*

Quadro 6 – Estrutura da sentença GLL

\$	GPGLL	,	dddmmm.mmmmm	,	N/S	,	dddmmm.mmmmm	,	E/W	,	hhmmss.ss	,	A/V	*	CC
----	-------	---	--------------	---	-----	---	--------------	---	-----	---	-----------	---	-----	---	----

O Quadro 7 mostra a descrição de cada um dos campos de informação de uma sentença do tipo GLL.

Quadro 7 – Descrição dos campos da sentença GLL

Campo	Descrição
dddmmm.mmmmm	Latitude no formato dddmmm,mmmm (7 casas decimais)
N/S	Direção da latitude: N: Norte S: Sul
dddmmm.mmmmm	Longitude no formato dddmmm,mmmm (7 casas decimais)
E/W	Direção da longitude: E: Leste W: Oeste
hhmmss.ss	Hora universal na coordenada
A/V	<i>Status</i> A: indica que os dados são válidos V: indica que os dados são inválidos
CC	<i>Checksum</i> Soma para controle

A sentença VTG é composta de oito campos mais um campo de *checksum* e informa o rumo seguido e a velocidade de deslocamento do receptor. A estrutura da sentença VTG é mostrada no Quadro 8.

Quadro 8 – Estrutura da sentença VTG

\$	GPVTG	,	r.r	,	T	,	r.r	,	M	,	v.vv	,	N	,	v.vv	,	K	*	CC
----	-------	---	-----	---	---	---	-----	---	---	---	------	---	---	---	------	---	---	---	----

O Quadro 9 mostra a descrição de cada um dos campos de informação de uma sentença do tipo VTG.

Quadro 9 – Descrição dos campos da sentença VTG

Campo	Descrição
r.r	Rumo
T	Caractere “T” indica que o rumo é relativo ao norte verdadeiro
r.r	Rumo
M	Caractere “M” indica que o rumo é relativo ao norte magnético
v.vv	Velocidade em relação ao solo em nós (até 2 casas decimais)
N	Um caractere “N” indica que a velocidade é dada em nós
v.vv	Velocidade em relação ao solo em km h ⁻¹ (até 2 casas decimais)
K	Um caractere “K” indica que a velocidade é dada em km h ⁻¹
CC	<i>Checksum</i> Soma para controle

O receptor de GPS móvel AgGPS 132 foi configurado para enviar somente as sentenças GLL e VTG através de sua interface serial, a taxa de uma sentença completa (sentenças GLL e VTG) por segundo.

3.2.8 Sinais de excitação

Para o funcionamento do equipamento de formulação, dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos, a rotação dos motores deve ser comandada por informações contidas em mapas de aplicação, que por sua vez dependem da posição geo-referenciadas obtidas de um GPS. Para a realização dos testes para o controle de rotação dos motores hidráulicos do equipamento, em laboratório, foram empregados sinais de excitação para os motores de forma a testar o comportamento do equipamento em situações que se assemelham a uma operação real em campo.

Os sinais de excitação habitualmente usados para teste de sistemas são funções degrau, funções rampa, funções parábola, funções impulso, funções senoidais, etc. Com o emprego destes sinais de excitação, análises matemáticas e experimentais de sistemas de controle podem ser feitas com facilidade, pois estes sinais são funções facilmente descritas em relação ao tempo.

Um sistema de controle cujo projeto foi baseado em sinais de teste convenientemente adotados, normalmente possui desempenho satisfatório para as entradas reais. O uso de tais sinais de teste nos permite comparar o desempenho de todos os sistemas na mesma base.

Excitação do tipo degrau

Utilizou-se um sinal de excitação do tipo degrau modificado (Figura 30) para se avaliar características de desempenho do sistema tais como: erro em regime permanente, tempo de atraso, tempo de subida, tempo de acomodação e o sobresinal máximo.

A função de transferência⁴⁵ (FT) de um degrau, partindo de um valor zero e com amplitude R , no domínio da frequência, pode ser descrita pela Equação 7, onde s é a variável complexa de Laplace⁴⁶.

⁴⁵ A função de transferência (FT) de um sistema é comumente utilizada para caracterizar as relações de entrada e saída, que podem ser descritas por equações diferenciais lineares invariantes no tempo (OGATA, 2003).

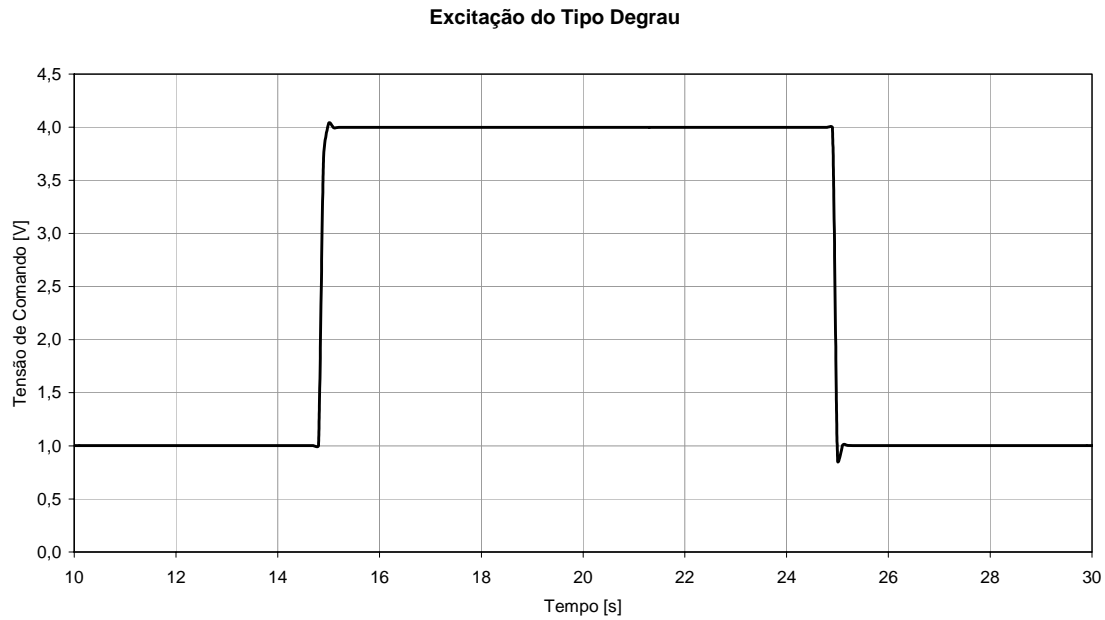


Figura 30 – Excitação do tipo degrau, expresso em valores de tensão de comando

$$R(s) = \frac{R}{s} \quad \text{Equação 7}$$

A excitação do tipo degrau consiste de um sinal que parte de uma tensão de um volt, sendo então elevado rapidamente para uma tensão de quatro volts, sendo mantida neste nível durante 10 segundos. A tensão é então rapidamente reduzida novamente para um volt, sendo mantida neste nível até o final do teste. Portanto, a amplitude do degrau é de três volts, correspondendo a 60 % da excursão máxima permitida que é de cinco volts, de maneira a evitar possíveis danos ao sistema mecânico e hidráulico do equipamento.

⁴⁶ A transformada de Laplace é um método operacional que pode ser usado de maneira proveitosa para solucionar equações diferenciais lineares. Por meio de sua utilização, é possível se converter muitas funções (funções senoidais, funções senoidais amortecidas, funções exponenciais, equações diferenciais ordinárias, etc.), em funções algébricas na variável complexa s (OGATA, 2003).

Para a realização dos testes em malha fechada, o sinal de excitação do tipo degrau foi expresso em valores de rotação como mostrado na Figura 31.

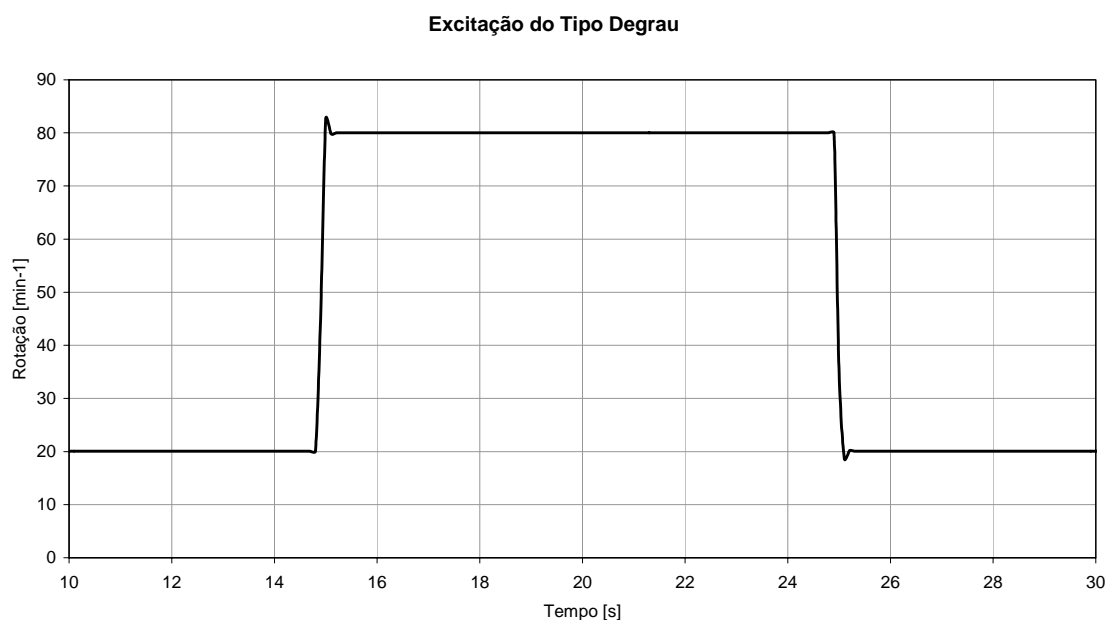


Figura 31 – Excitação do tipo degrau, expresso em valores de rotação

O sinal de excitação do tipo degrau, expresso em valores de rotação, consiste de um sinal que parte de uma rotação de 20 min^{-1} , sendo então elevado rapidamente para um valor de 80 min^{-1} , sendo mantido nesse patamar durante 10 segundos. A rotação é então rapidamente reduzida novamente para 20 min^{-1} , sendo mantida neste nível até o final do teste. Portanto, a amplitude do degrau é de 60 min^{-1} , também correspondendo a 60 % da excursão máxima permitida que é de 100 min^{-1} .

Excitação do tipo degraus múltiplos

O sinal de excitação do tipo degraus múltiplos consiste de uma seqüência de dez degraus crescentes de rotação, seguidos de dez degraus decrescentes. O sinal parte de uma tensão de zero volt, sendo então incrementado em 0,5 volt a cada 10 segundos até que se atinja cinco volts. O sinal de excitação é mantido em cinco volts durante 10 segundos e então é

decrementado de 0,5 volt a cada 10 segundos até que se atinja novamente zero volt. A duração deste sinal de teste é de aproximadamente 190 segundos.

A finalidade deste sinal de excitação foi analisar divergências entre a rotação desejada e a rotação obtida e, também, a existência de histerese. O sinal de excitação do tipo degraus múltiplos, expresso em valores de tensão de comando, é mostrado na Figura 32.

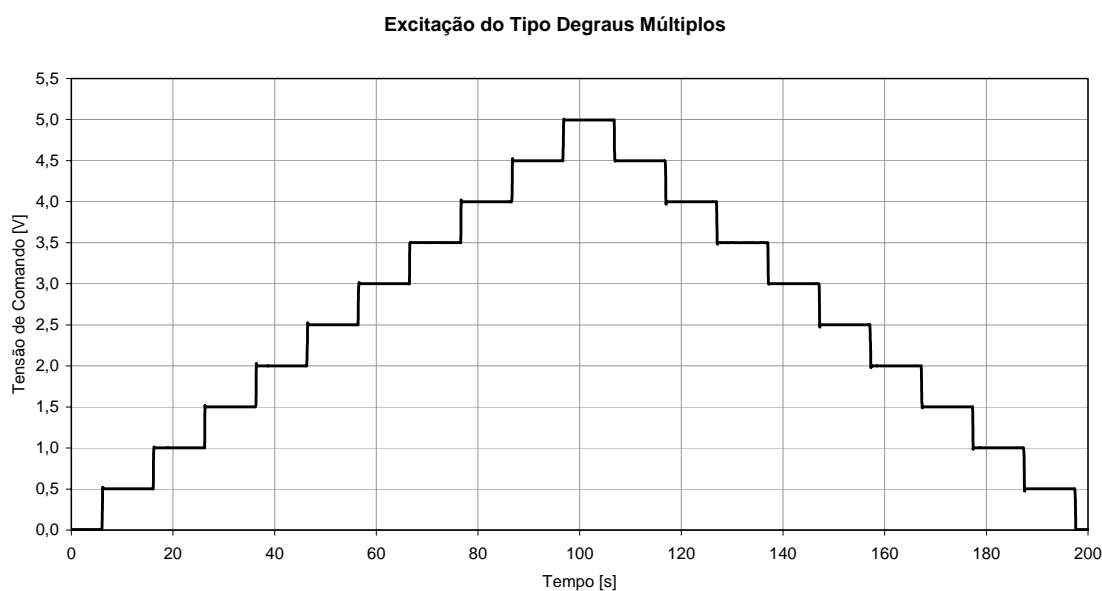


Figura 32 – Excitação do tipo degraus múltiplos, expresso em valores de tensão de comando

Para a realização dos testes em malha fechada, o sinal de excitação do tipo degraus múltiplos foi expresso em valores de rotação como mostrado na Figura 33.

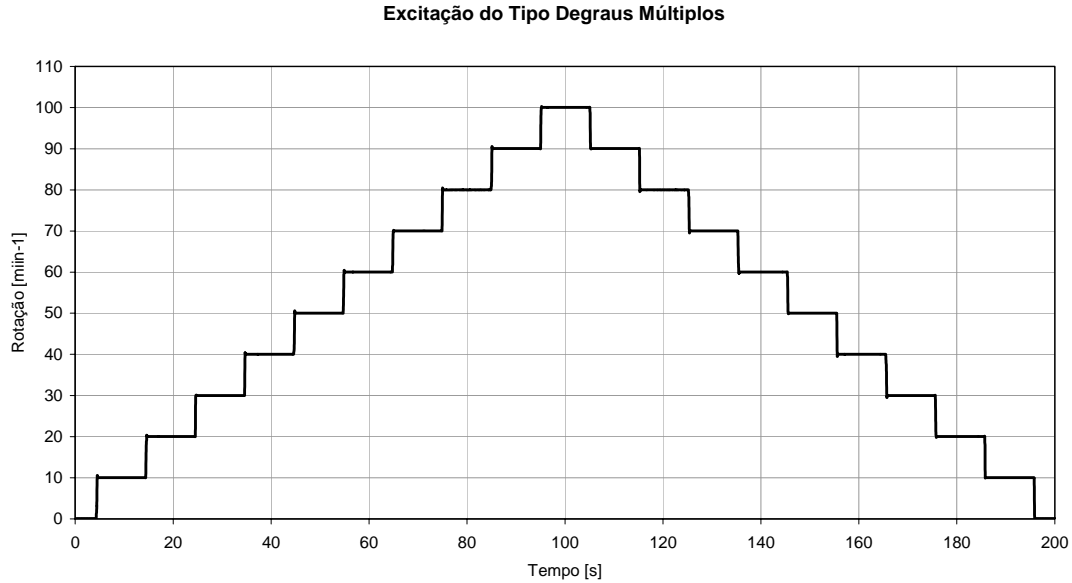


Figura 33 – Excitação do tipo degraus múltiplos, expresso em valores de rotação

O sinal de excitação do tipo degraus múltiplos, expresso em valores de rotação, consiste de uma seqüência de 10 degraus crescentes de rotação de 10 min^{-1} , partindo de uma rotação nula, onde cada patamar de rotação tem a duração de 10 segundos. A partir da rotação de 100 min^{-1} são aplicados uma seqüência de 10 degraus decrescentes, com amplitude de 10 min^{-1} , onde cada patamar também tem a duração de 10 segundos.

Excitação do tipo rampa rápida

Este sinal de excitação consiste de uma rampa de subida, seguida de uma estabilização para em seguida iniciar uma rampa decrescente. A função de transferência (FT) de uma rampa, partindo de um valor zero e com fator de inclinação R , no domínio da frequência, pode ser descrita pela Equação 8, onde s é a variável complexa de Laplace.

$$R(s) = \frac{R}{s^2} \quad \text{Equação 8}$$

Para a rampa de subida R deve assumir o valor 0,5 e para a rampa de descida, R deve assumir o valor $-0,5$. Este tipo de sinal de excitação tem a finalidade de avaliar a capacidade do equipamento em alterar rapidamente a rotação do motor hidráulico, e conseqüentemente, a vazão do pré-formulado.

O sinal de excitação inicia-se com o sinal de controle em zero volt, sendo então continuamente aumentado a uma taxa de 0,5 volt por segundo até se atingir o valor limite de cinco volts. O sinal de excitação é então mantido em cinco volts durante 10 segundos e sendo novamente zerado a uma taxa de $-0,5$ volt por segundo.

Este tipo de sinal de excitação teve a finalidade de avaliar a capacidade do equipamento em alterar rapidamente a rotação do motor hidráulico, e conseqüentemente, a vazão do pré-formulado. A Figura 34 mostra o sinal de excitação do tipo rampa rápida, expresso em função da tensão de comando.

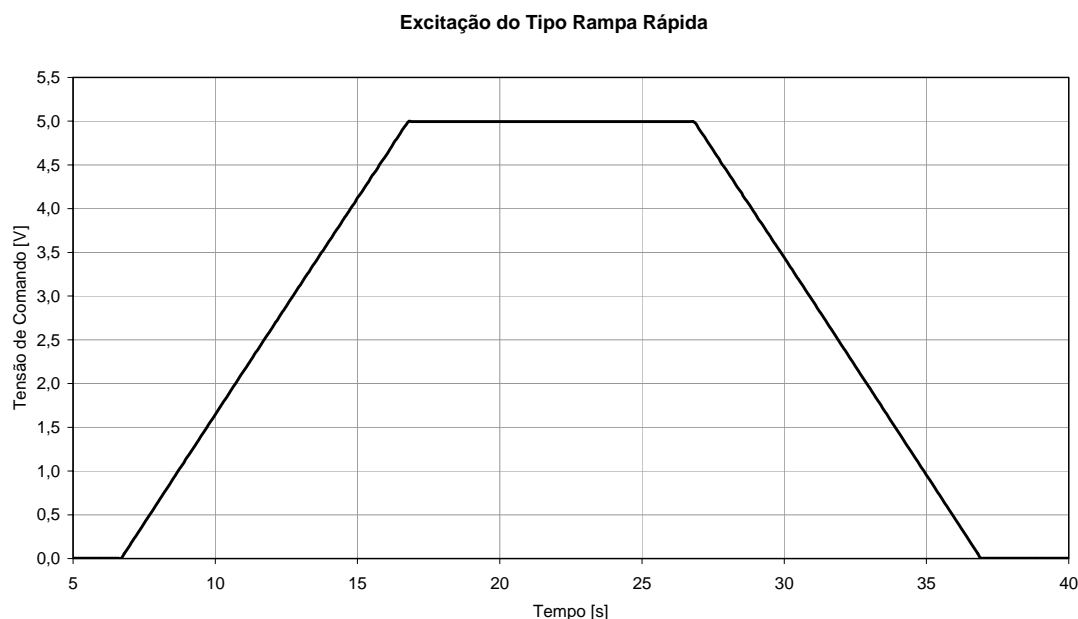


Figura 34 – Excitação do tipo rampa rápida, expresso em valores de tensão de comando

Para a realização dos testes em malha fechada, o sinal de excitação do tipo rampa rápida foi expresso em valores de rotação como mostrado na Figura 35.

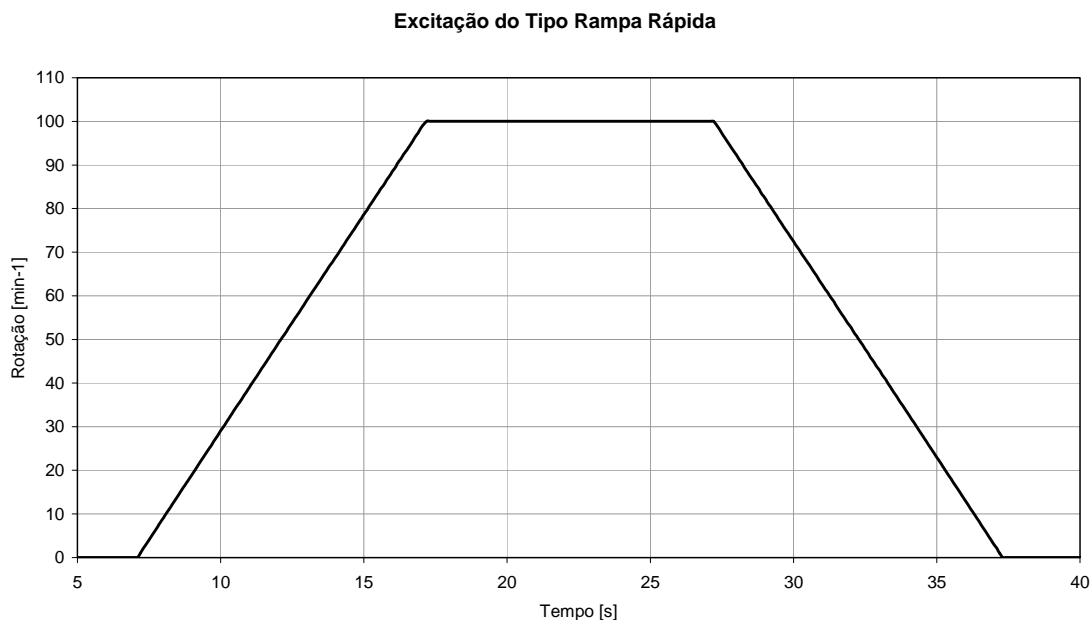


Figura 35 – Excitação do tipo rampa rápida, expresso em valores de rotação

O sinal de excitação do tipo rampa rápida, expresso em valores de rotação, consiste de um sinal que parte de uma rotação nula, crescendo linearmente a uma taxa de 10 min^{-1} por segundo até se atingir o valor limite de 100 min^{-1} . O sinal de excitação é então mantido no patamar de 100 min^{-1} durante 10 segundos e sendo então novamente zerado a uma taxa -10 min^{-1} por segundo.

Excitação do tipo rampa lenta

Este tipo de sinal de excitação tem a finalidade de avaliar a capacidade do equipamento em alterar lentamente a rotação do motor hidráulico, e conseqüentemente, a vazão do pré-formulado. Expressando-se um sinal de teste do tipo rampa através de sua função de transferência (Equação 8) deve-se adotar um valor de R de 0,083 para a rampa de subida e um valor de R de $-0,083$ para a rampa de descida.

O sinal de excitação inicia-se com zero volt crescendo a uma taxa de 0,083 volt por segundo, até se atingir o valor de cinco volts, que acontece após 60 segundos do seu início da

rampa crescente. O sinal de excitação é mantido no patamar de cinco volts durante 10 segundos. Inicia-se então uma rampa decrescente com inclinação de $-0,083$ volt por segundo até se atingir novamente zero volt após 60 segundos do início do decrescimento. A Figura 36 mostra o sinal de teste do tipo rampa lenta expresso em função da tensão de comando.

Com o uso deste sinal de excitação pode-se determinar a diferença entre a rotação desejada (sinal de controle) e a rotação obtida nos dosadores em um regime de solicitação dinâmico. Este sinal de excitação também possibilita a determinação do tempo de atraso entre o sinal de controle e a rotação do motor.

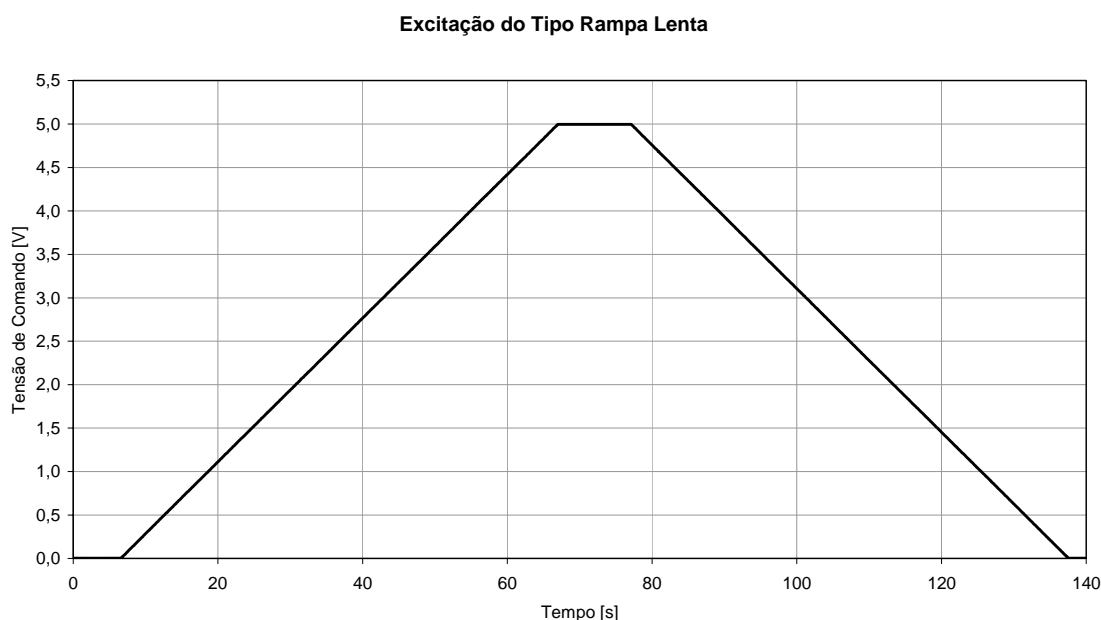


Figura 36 – Excitação do tipo rampa lenta, expresso em valores de tensão de comando

Para a realização dos testes em malha fechada, o sinal de excitação do tipo rampa lenta, foi expresso em valores de rotação como mostrado na Figura 37.

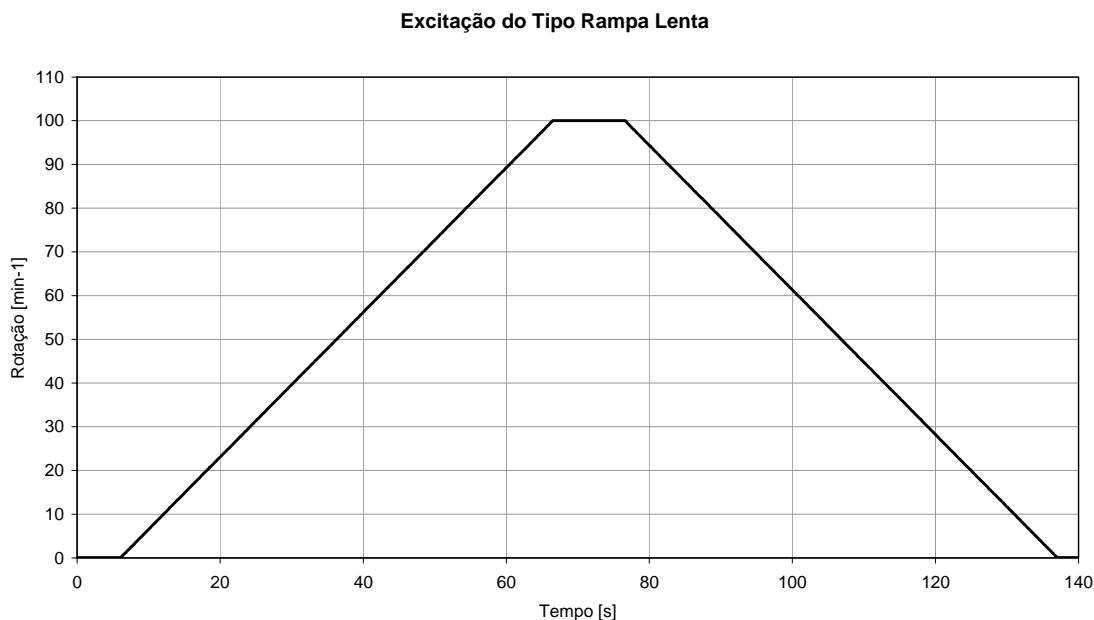


Figura 37 – Excitação do tipo rampa lenta, expresso em valores de rotação

O sinal de excitação do tipo rampa lenta, expresso em valores de rotação, consiste de um sinal que parte de uma rotação nula, crescendo linearmente a uma taxa de $1,66 \text{ min}^{-1}$ por segundo até se atingir o valor limite de 100 min^{-1} . O sinal de excitação é então mantido em 100 min^{-1} durante 10 segundos e sendo novamente zerado a uma taxa $-1,66 \text{ min}^{-1}$ por segundo.

Excitação do tipo rampas múltiplas

O sinal de excitação do tipo rampas múltiplas consiste de uma sequência de cinco rampas crescentes, seguidas por um valor constante de rotação, até se atingir cinco volts. A taxa de crescimento das rampas é de $0,1 \text{ volt}$ por segundo. O valor dos incrementos, após as rampas crescentes foi de um volt. A partir da tensão de cinco volts, o sinal apresenta cinco rampas decrescentes, seguidas por um valor constante, retornando novamente a zero volt. A inclinação das rampas decrescentes da rampa é de $-0,1 \text{ volt}$ por segundo. O valor do incremento após as rampas decrescentes é de um volt.

A finalidade deste sinal de excitação é a de simular uma operação real do equipamento, onde a rotação do eixo deve ser alterada de um valor para outro em um pequeno intervalo de tempo e, ser então mantida nesse patamar durante algum tempo. A Figura 38 mostra o sinal de excitação do tipo rampas múltiplas expresso em função da tensão de comando.

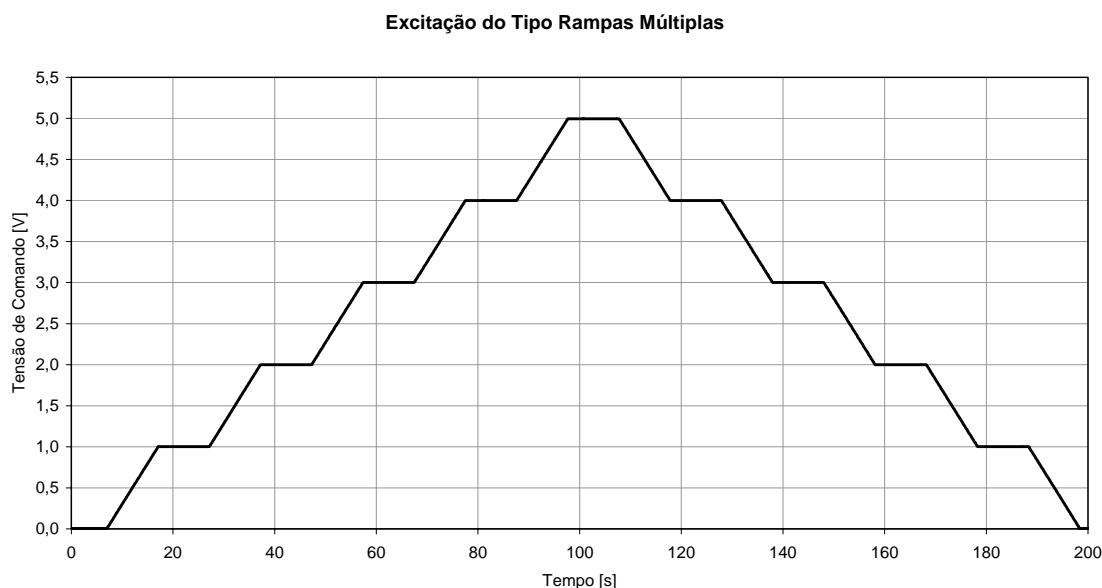


Figura 38 – Excitação do tipo rampas múltiplas, expresso em valores de tensão de comando

Para a realização dos testes em malha fechada, o sinal de excitação do tipo rampas múltiplas foi expresso em valores de rotação como mostrado na Figura 39. Para permitir uma adequação do sinal de excitação aos valores praticáveis de rotação, limitou-se o valor máximo de rotação a 90 min^{-1} .

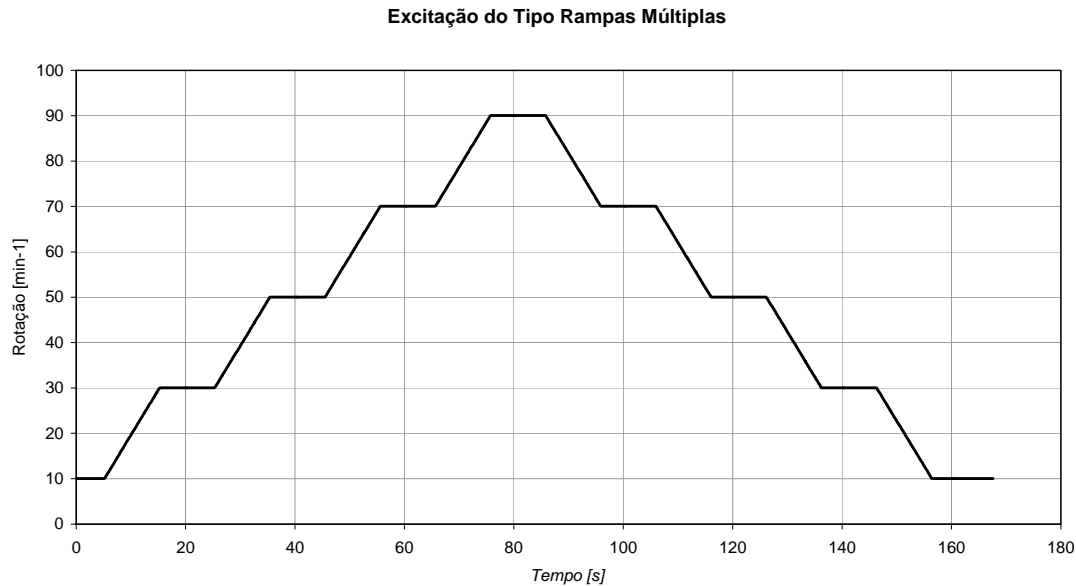


Figura 39 – Excitação do tipo rampas múltiplas, expresso em valores de rotação

O sinal de excitação do tipo rampas múltiplas, expresso em valores de rotação, consiste de um sinal formado por uma sequência de quatro rampas crescentes, partindo de uma rotação inicial de 10 min^{-1} . As rampas possuem taxa de elevação de 2 min^{-1} por segundo e conduzem a um incremento de rotação de 20 min^{-1} . Cada rampa é seguida por um valor constante de rotação, com duração de 10 segundos, até se atingir a rotação de 90 min^{-1} . A partir da rotação de 90 min^{-1} o sinal apresenta quatro rampas decrescentes, com taxa de decaimento de 2 min^{-1} por segundo, levando a um decremento de rotação de 20 min^{-1} . As rampas decrescentes são seguidas por um valor constante de rotação com duração de 10 segundos, até retornar novamente a rotação de 10 min^{-1} .

3.2.9 Testes do equipamento

Para os testes em laboratório utilizou-se um motor elétrico para o acionamento da bomba hidráulica, dispensando a necessidade do uso de um trator agrícola como unidade de potencia. Com o propósito de se obter um controle da rotação do conjunto motor / bomba foi

empregado conversor de frequência (também conhecido como inversor de frequência). Para o correto funcionamento do conversor de frequência inicialmente é necessário se programar os dados do motor constantes de sua placa de identificação (valores nominais de tensão, corrente, potência, rendimento, frequência e fator de potência).

O conversor de frequência ACS 601 utilizado nos testes do equipamento possui uma facilidade denominada “*Motor ID*” que possibilita uma identificação de algumas características elétricas do motor. A partir da execução da função “*Motor ID*”, o modelo matemático utilizado pelo conversor no controle de rotação pode ser melhorado.

Foram realizados testes iniciais para efetuar ajustes básicos no equipamento, tais como: ajuste na pressão da válvula de alívio, configuração dos amplificadores PWM e configuração do conversor de frequência para o acionamento do motor elétrico.

Para a avaliação em laboratório, desenvolveu-se um aplicativo que permite simular diversas situações de operação do equipamento e utilizou-se, conjuntamente, um sistema de aquisição de dados. As simulações de aplicação utilizadas nos testes do equipamento visaram explorar situações críticas e também situações reais de uma operação em campo. Foram criadas também situações com a ocorrência de uma variação na rotação na bomba de acionamento do sistema, simulando uma situação onde exista variação na rotação na tomada de potência do trator agrícola (TDP). Os testes foram realizados sem carga, isto é, sem a colocação de fertilizantes nos reservatórios.

Inicialmente foram realizados testes em malha aberta, ou seja, sem a presença dos controladores de rotação dos motores. Finalizada essa etapa de testes, modificou-se o sistema para que o mesmo operasse em malha fechada, ou seja, com a utilização dos controladores de rotação dos motores.

Por intermédio de uma metodologia experimental (Ziegler-Nichols), foram obtidos os parâmetros iniciais dos controladores do tipo PID. Posteriormente utilizou-se um método iterativo para um ajuste fino dos parâmetros do controlador. Finalmente, foram repetidos os testes experimentais utilizando-se os controladores com os parâmetros PID obtidos e analisou-se os resultados.

Para avaliação dos resultados foram observados graficamente os resultados das rotações dos eixos e comparou-se com o respectivo sinal de excitação. Foram calculados também os parâmetros de desempenho em cada um dos testes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos pela realização do presente trabalho. Como o objetivo principal foi o desenvolvimento de um sistema de controle do equipamento de formulação, dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos, entende-se como resultados obtidos, não só aqueles relativos ao desempenho do equipamento, mas também, todo os procedimentos e metodologia para o desenvolvimento do sistema como um todo.

4.1 Integração dos Sistemas

Para o correto funcionamento do equipamento, foi necessário se desenvolver todo o projeto e implementação do sistema de acionamento e controle eletrônico de rotação dos motores hidráulicos. O sistema proposto possui componentes elétricos e eletrônicos sofisticados, alguns deles desenvolvidos especialmente para a aplicação no equipamento. Desenvolveu-se também uma interface com o sistema de GPS de modo que o equipamento pudesse alterar a formulação e a dosagem de fertilizantes de acordo com sua posição georeferenciada.

Os principais componentes necessários ao funcionamento do sistema são: microcomputador do tipo portátil, sistema de posicionamento global, cartões de entrada e saída de sinais, aplicativo para controle e monitoramento do equipamento.

A Figura 40 mostra o esquema de integração dos principais componentes eletroeletrônicos do sistema.

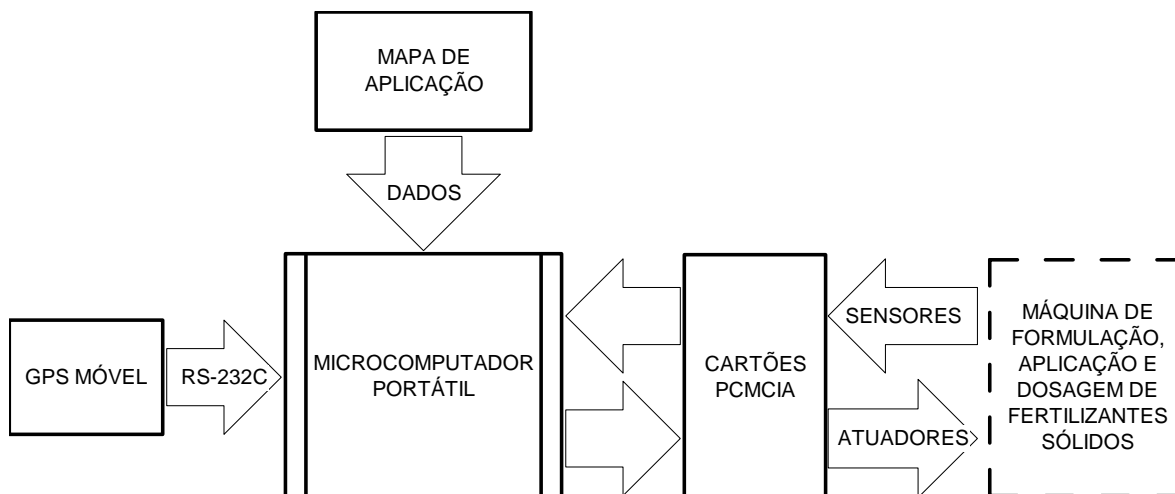


Figura 40 – Integração dos componentes eletrônicos

Projetou-se o sistema de controle do equipamento de aplicação utilizando-se como elemento principal de controle um microcomputador. Por razões de portabilidade e robustez, adotou-se uma plataforma computacional do tipo portátil (baseada em uma plataforma padrão PC). O microcomputador tem a função de gerenciar todo o funcionamento do equipamento durante a operação normal e também durante os testes realizados. No microcomputador foram instalados dois cartões de entrada e saída de sinais, o programa principal de controle e monitoração, desenvolvido em ambiente LabVIEW, e sub-rotinas para leitura do sinal de GPS.

4.1.1 Descrição do funcionamento do sistema de controle

Inicialmente o microcomputador recebe e processa as informações do sistema de posicionamento global que são fornecidas no formato NMEA-0183, através de uma interface serial padrão RS-232C.

A partir dos dados de posicionamento o aplicativo lê as informações dos mapas de aplicação, referentes a cada um dos dosadores. As informações contidas no mapa podem ser traduzidas como informações de rotação dos dosadores. Para a especificação da rotação dos dosadores também é necessária a determinação da velocidade de deslocamento do equipamento. Uma velocidade de deslocamento maior se traduz em uma rotação maior dos

dosadores, enquanto que uma velocidade de deslocamento menor se traduz em uma rotação menor dos dosadores, para um mesmo ponto no mapa de aplicação.

Para o correto funcionamento do equipamento é necessário o controle preciso da rotação dos motores de acionamento dos dosadores. Para tanto, desenvolveu-se controladores de rotação implementados no ambiente de desenvolvimento LabVIEW. Por meio de técnicas da Teoria Clássica de Controle, projetou-se e implementou-se, na versão final, controladores do tipo Proporcional + Integral + Derivativo (PID), com realimentação de saída. Neste tipo de sistema de controle a rotação real é comparada com a rotação desejada, gerando-se um sinal de erro que é então aplicado ao controlador.

Elaborou-se um aplicativo computacional que tem como função ler e interpretar o mapa de aplicação localizada de insumos, a posição geo-referenciada e corrigida, provida pelo sistema DGPS, e a velocidade de deslocamento. As velocidades instantâneas de cada um dos motores são obtidas pelos sensores de velocidade angular existentes nos eixos de acionamento dos dosadores. Os sinais destes sensores contêm informações em frequência que são convertidos para valores de tensão e então lidos pelos cartões DAQCard 1200 por meio de suas entradas analógicas. São então gerados os sinais de comando, através das saídas D/A dos cartões DAQCard, para os amplificadores PWM que controlam as três válvulas proporcionais de comando dos motores hidráulicos.

4.1.2 Sistema de acionamento das válvulas de controle de fluxo

Para a excitação das bobinas eletromagnéticas das válvulas proporcionais de fluxo, optou-se pela utilização um sistema de acionamento do tipo Modulação por Largura de Pulso (PWM). Neste tipo de acionamento, as bobinas são alimentadas por um sinal contínuo, porém pulsante. A frequência de acionamento é mantida constante, porém, a largura dos pulsos de acionamento pode ser alterada, modificando-se desta forma a tensão média e, conseqüentemente, a intensidade da corrente.

Os amplificadores PWM utilizados para acionamento das bobinas das válvulas proporcionais, possuem ajustes de corrente mínima (0 a 0,6 A), corrente máxima (0,6 A a 2,0

A), rampa de subida (0,05 s a 5 s), rampa de descida (0,05 s a 5 s) e frequência de acionamento (70 Hz a 350 Hz). A Figura 41 mostra o aspecto do amplificador PWM utilizado.

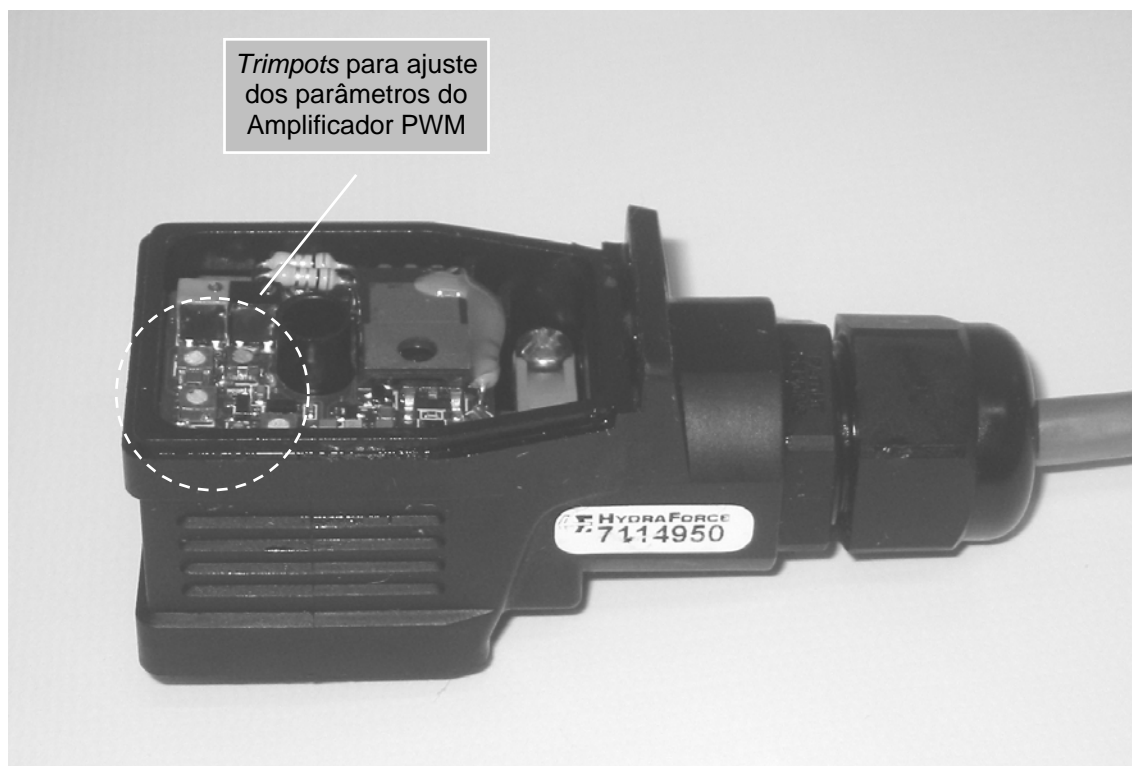


Figura 41 – Amplificador PWM

O fabricante sugere a utilização de frequências de acionamento na faixa de 70 Hz a 350 Hz. Foram feitos testes com o intuito de se escolher a frequência de acionamento mais adequada. Os melhores resultados foram obtidos utilizando-se uma frequência de 100 Hz. Ajustou-se os limites da corrente de acionamento para um mínimo de 0,6 A e um máximo de 1,5 A. O uso de um valor de corrente mínima superior a zero foi importante para garantir um rápido acionamento possibilitando uma resposta tipicamente linear das válvulas. O limite superior da corrente deve ser respeitado para que não haja possibilidade de danos às bobinas por sobrecorrente. Cada um dos três conjuntos amplificador PWM / bobina eletromagnética foi individualmente ajustado e testado. Ajustou-se também os valores para rampa de subida e rampa de descida para 0,05 segundos, de modo que o sistema se comporte com a maior velocidade possível.

4.1.3 Interface de entrada e saída de sinais

As entradas analógicas de um dos cartões DAQCard 1200 foram utilizadas para a leitura da rotação dos eixos de acionamento dos dosadores. Para tanto, foram configuradas para a leitura dos sinais de tensão na faixa de 0 a 5 V_{DC} fornecidos pelos conversores frequência / tensão (F/V) conectados aos sensores de rotação. A Figura 42 mostra o esquema de ligação utilizado para a leitura da rotação dos eixos de acionamentos dos dosadores.

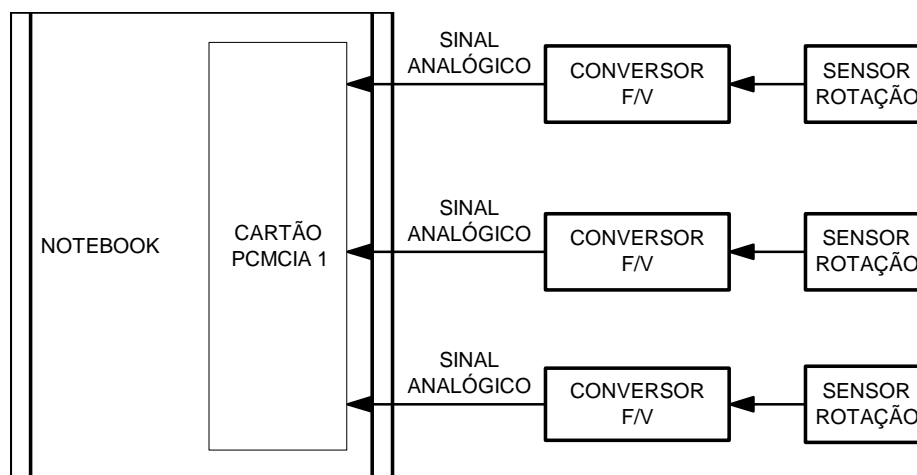


Figura 42 – Esquema de ligação dos sensores de rotação a um dos cartões DAQCard 1200

Os sinais analógicos de comando foram gerados pelos dois cartões DAQCard 1200. Cada um dos cartões utilizados possui duas saídas analógicas, totalizando quatro saídas em tensão. Três das saídas dos cartões DAQCard 1200 (configuradas para gerar sinais na faixa de 0 a 5 V_{DC}) foram ligadas aos três amplificadores PWM.

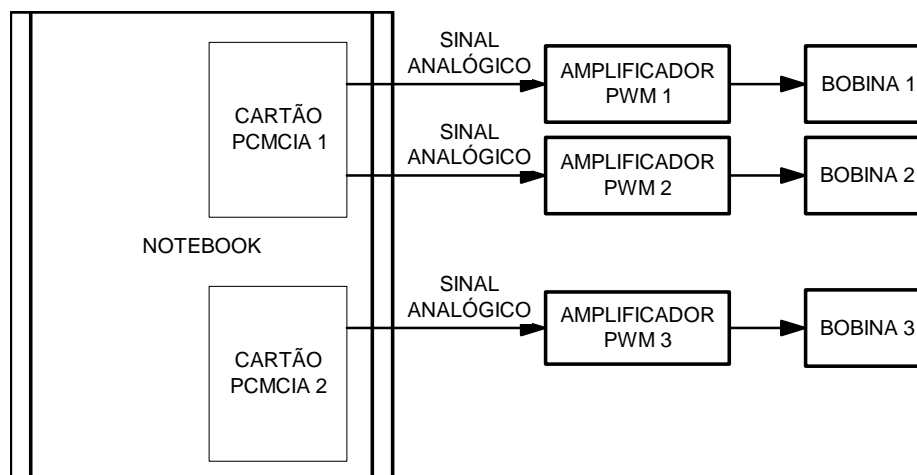


Figura 43 – Esquema de ligação dos amplificadores PWM aos cartões de aquisição de dados e controle DAQCard 1200

Construiu-se um módulo de interface para conexão dos cartões PCMCIA com os conversores F/V dos sensores de rotação e com os amplificadores PWM. A função da interface foi prover uma conexão elétrica dos sinais de entrada dos conversores A/D com a saída dos conversores F/V. Também teve a função de conectar a saída dos conversores D/A com a entrada de controle e fornecer também a alimentação dos amplificadores. Utilizou-se conectores do tipo DB-9 “macho” para a entrada dos sinais de rotação e DB-9 fêmea para ligação dos amplificadores PWM. Nesta interface foram instalados um fusível de proteção e uma chave liga-desliga geral.

No interior do módulo de interface foram fixados os dois blocos de conectores CB-50LP. Estes blocos de conectores são ligados aos cartões DAQ Card 1200 através de cabos chatos (*flat cables*) de 50 vias.

4.1.4 Sistema de acionamento da bomba hidráulica

Nos testes do equipamento utilizou-se um motor elétrico para o acionamento da bomba hidráulica. O motor aciona a bomba hidráulica por um acoplamento elástico evitando que um eventual desalinhamento dos conjuntos possa causar maiores danos tanto à bomba quanto para o motor elétrico. Um flange une mecanicamente o conjunto motor elétrico / bomba hidráulica.

Foi utilizado um conversor de frequência para o acionamento do motor elétrico, permitindo o controle da rotação do mesmo. Para o acionamento da bomba foi necessária a utilização de um motor de 7,35 quilowatts de potência para suprir a necessidade energética do equipamento. Não é recomendada a partida de um motor deste porte diretamente com a sua tensão nominal. Desta forma o conversor de frequência foi programado para executar uma partida com aceleração do tipo rampa, com duração de 10 segundos. Utilizou-se uma rampa de parada também de 10 segundos. Com a utilização das rampas de partida e parada, garantiu-se um funcionamento suave do conjunto motor elétrico e bomba hidráulica e, também se preservou o sistema elétrico de alimentação.

Os testes foram realizados com o conversor de frequência configurado com os parâmetros operacionais do motor utilizado. Devido à inexistência, no local de instalação e testes do equipamento, de alimentação trifásica em 380 V_{AC}, foi utilizado um autotransformador com potência nominal de 10 kW, para prover a elevação de tensão de 220 V_{AC} para 380 V_{AC}.

Montou-se uma estrutura móvel agrupando o conversor de frequência e o autotransformador. Foi instalado um disjuntor para seccionamento e proteção dos equipamentos e também uma tomada industrial para ligação do motor. A Figura 44 mostra o esquema de ligação utilizado.

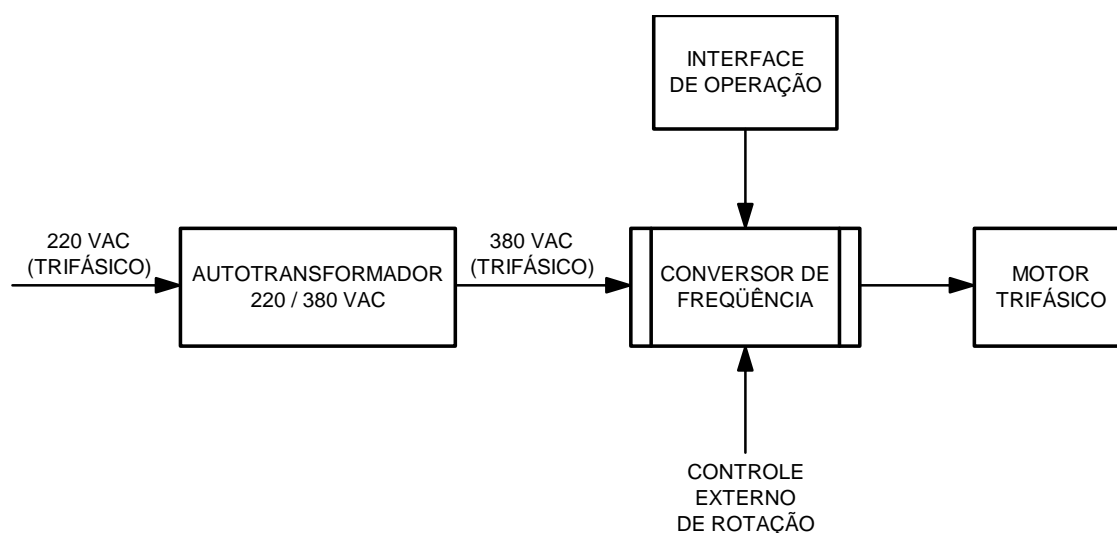


Figura 44 – Esquema de ligação elétrica do motor elétrico para acionamento da bomba hidráulica

A Figura 45 mostra o conjunto autotransformador / conversor de frequência montado sobre uma bancada móvel.

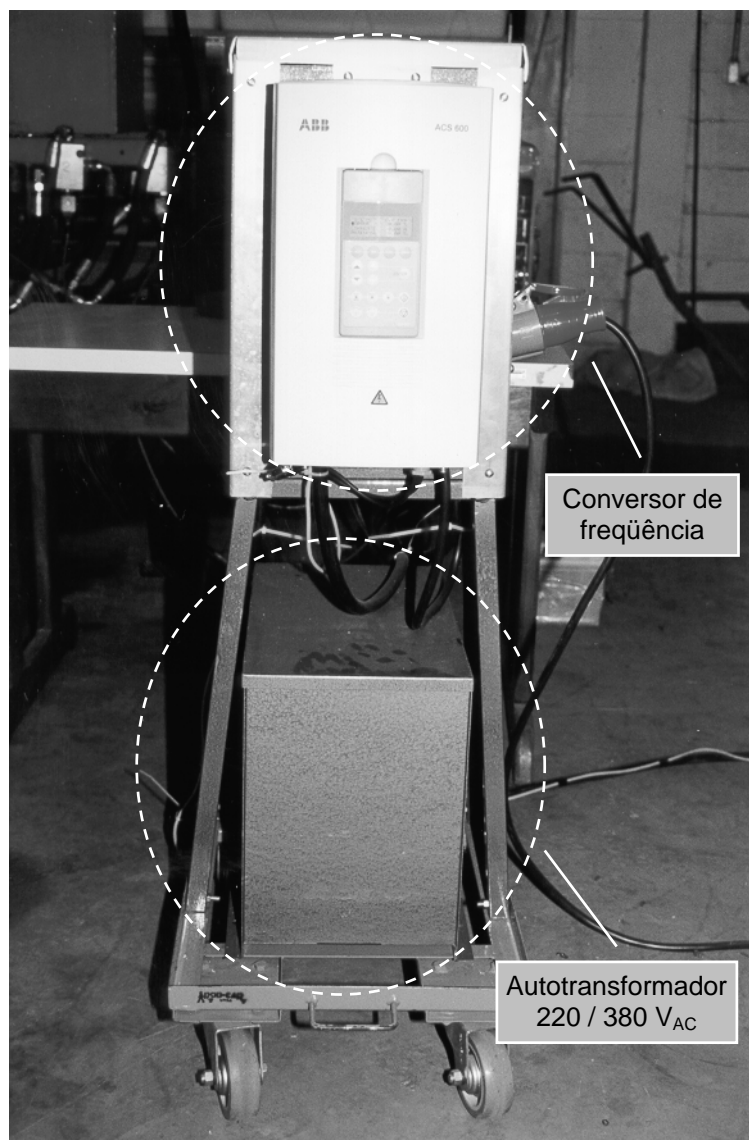


Figura 45 – Bancada móvel para acionamento do motor elétrico, contendo o autotransformador e o conversor de frequência

O conversor de frequência utilizado nos testes pode ser operado através do seu painel frontal de controle ou ainda através de comando remoto. Na maioria dos testes o conversor foi operado pelo painel frontal, porém, nos testes onde era necessário se variar continuamente a rotação do motor elétrico, o comando do conversor de frequência foi realizado através de um sinal em tensão, na faixa de 0 a 10 V_{DC}.

O conversor de frequência utilizado possui uma saída analógica, em tensão, proporcional à rotação do motor, que foi utilizada para registro da rotação do motor elétrico nos testes onde foi necessário alterar-se a rotação do mesmo.

4.1.5 Sistema para controle da rotação da bomba

Em alguns testes foi necessária a alteração da vazão de óleo do sistema mediante a alteração da rotação da bomba hidráulica. Para tanto, a rotação do motor elétrico foi alterada mediante variação de um sinal de controle externo, aplicado ao conversor de frequência. Nos testes, este sinal de controle foi gerado por uma das saídas analógicas de um dos cartões DAQCard 1200, cujo esquema de ligação com o conversor de frequência está mostrado na Figura 46.

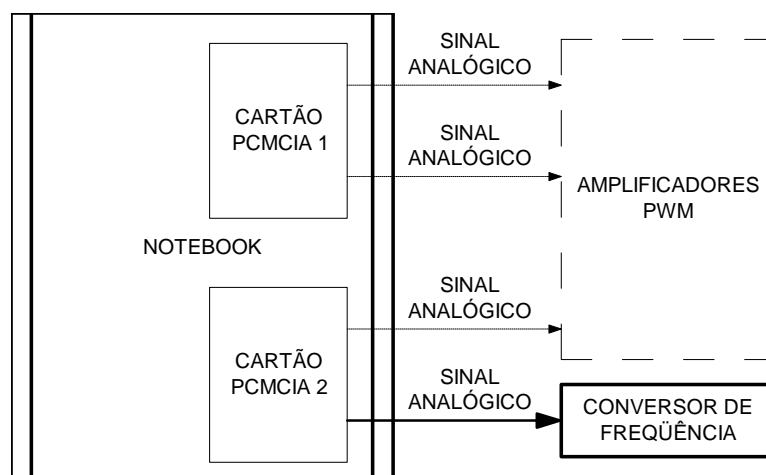


Figura 46 – Esquema de ligação do cartão DAQ Card 1200 com o conversor de frequência

A saída analógica do cartão DAQCard 1200, utilizada para comandar a rotação do motor elétrico, foi configurada para gerar sinais na faixa de 0 a 10 V_{DC}, atendendo aos requisitos elétricos do sistema de controle da rotação do motor elétrico.

4.2 Desenvolvimento de Aplicativos Computacionais

Foi utilizado o ambiente de desenvolvimento LabVIEW, versão 5.1, da National Instruments, e compatível com Windows 98. O aplicativo LabVIEW é ambiente gráfico de desenvolvimento que permite a implementação de aplicativos para aquisição de dados, processamento de sinais, sistemas de controle, etc. Essa linguagem se caracteriza por ser gráfica e pela facilidade de acesso a dispositivos de hardware.

O aplicativo LabVIEW se baseia em duas interfaces: uma é denominada VI's⁴⁷ e se destina ao interfaceamento gráfico com o usuário. A outra, denominada “*diagram*”, permite a realização de conexões de hardware e processamento matemático de informações. São disponíveis rotinas de aquisição e processamento de sinais, funções lógicas e matemáticas, sistemas de controle, banco de dados, etc.

Existem diversos módulos, chamados “*toolkits*”, que englobam diversas funções específicas e que podem ser acrescentados ao programa principal. Para o desenvolvimento de algumas subrotinas utilizou-se o “*toolkit*” denominado “*control*”.

4.2.1 Controle geral do equipamento

Para facilitar o desenvolvimento do programa de controle e monitoramento do equipamento, subdividiu-se o mesmo em um programa principal e subrotinas. O programa principal é executado continuamente e, quando necessário, efetua a chamada das subrotinas.

Foi desenvolvido um aplicativo com a função de ler o mapa de aplicação localizada de insumos, ler a posição geo-referenciada a partir do receptor de GPS, calcular a velocidade e a direção de deslocamento do equipamento, gerar os sinais elétricos de comando das válvulas proporcionais, armazenar e indicar na tela do computador os dados de desempenho e condições operacionais do equipamento e seus subsistemas.

⁴⁷ VIs: *Virtual Instruments*.

Uma das sub-rotinas do programa principal lê e interpreta o mapa de aplicação localizada de insumos armazenado na forma de arquivo e o compara com a posição geo-referenciada e a velocidade de deslocamento corrigidas pelo sistema DGPS. O aplicativo então gera os sinais de comando, através das saídas D/A dos cartões PCMCIA, para os amplificadores PWM que controlam as três válvulas proporcionais de comando dos motores hidráulicos. As velocidades instantâneas de cada um dos motores são lidas pelos sensores de velocidade angular instalados nos eixos de acionamento dos dosadores. Caso seja necessário, o sistema de controle realimentado irá atuar, corrigindo a rotação dos motores.

Um fluxograma simplificado do aplicativo computacional de controle é mostrado na Figura 47. No funcionamento do programa a intervenção do operador é requerida quando há ausência de matéria prima em um dos depósitos, quando ocorrerem seguidos erros de posicionamento, quando o mapa de aplicação não corresponder à posição geo-referenciada do equipamento, ou ainda quando os sensores de rotação detectarem problemas no acionamento dos dosadores.

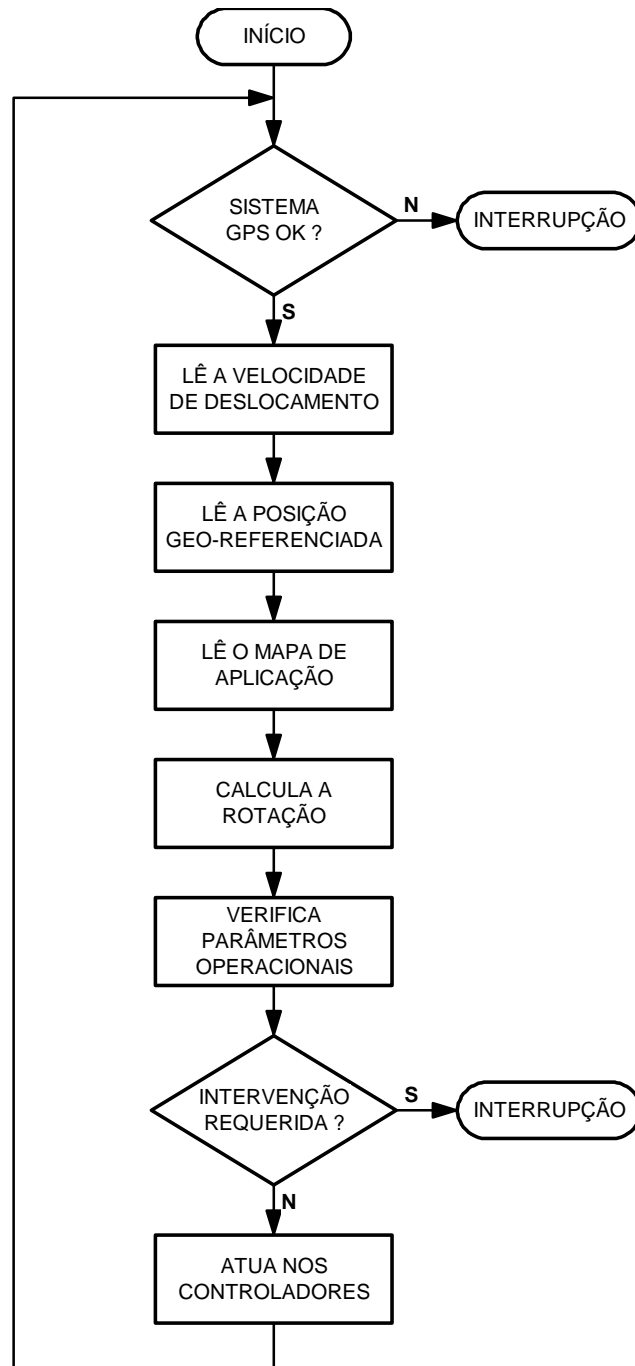


Figura 47 – Fluxograma simplificado do aplicativo computacional para o controle do equipamento

4.2.2 Implementação dos controladores de rotação

Os controladores do tipo PID para a rotação dos motores em malha fechada têm como entrada um sinal de referência de rotação, obtida a partir do mapa de aplicação de insumos. O controlador PID recebe como entradas a rotação desejada e a rotação real, medida pelo sensor de rotação. A partir da diferença entre a rotação desejada e a real, o controlador PID calcula o valor do sinal de atuação que será então aplicado ao amplificador PWM. A Figura 48 mostra o diagrama de blocos do sistema de controle PID em malha fechada, para a rotação dos motores hidráulicos.

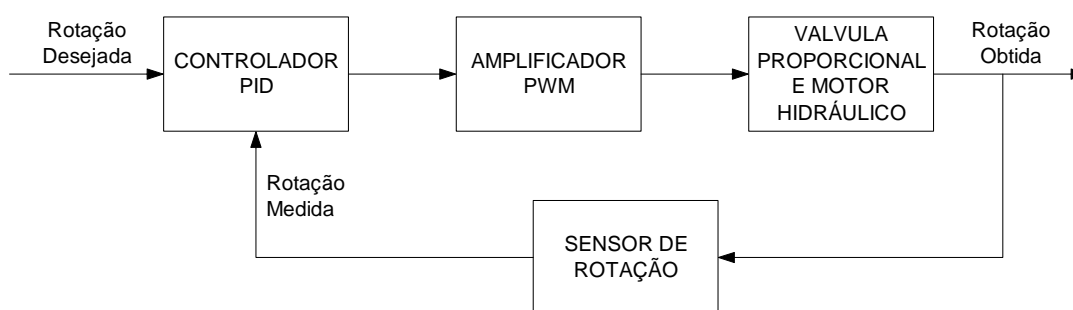


Figura 48 – Controlador para a rotação dos motores hidráulicos

Os controladores PID, implementados com o LabVIEW, cujo diagrama funcional está apresentado na Figura 49, utilizaram como base um componente denominado “*SIMPLE PID*”. Este componente realiza a função de um controle PID do tipo digital, possuindo uma entrada para a rotação desejada, uma entrada para a rotação medida e uma saída de atuação. A taxa de repetição utilizada para o controlador PID foi de 10 repetições por segundo. Esta taxa de repetição é suficientemente elevada para permitir o controle de um processo que envolve grandezas mecânicas, como as existentes no equipamento em estudo.

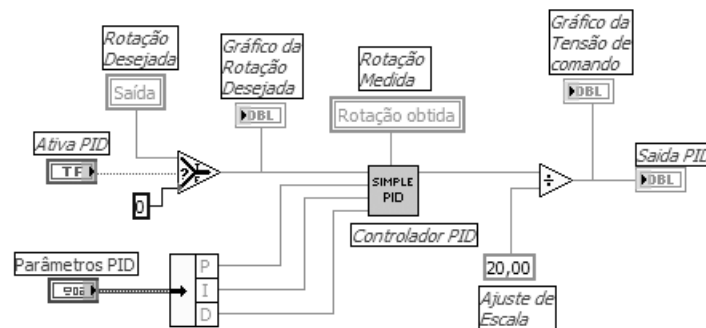


Figura 49 – Diagrama funcional do controlador de rotação do motor hidráulico, implementado em LabVIEW

No controlador PID existem também três entradas para os parâmetros de ganho proporcional, ganho integral e ganho derivativo. Limitou-se a saída do controlador PID a um valor mínimo de zero e um valor máximo de 100 min^{-1} . O Quadro 10 resume a faixa de variação e o incremento de cada um dos parâmetros do controlador PID.

Quadro 10 – Faixa de variação e incremento dos parâmetros do controlador PID

Parâmetro	Mínimo	Máximo	Incremento
P	0,1	10,0	0,1
I	0,0	5,0	0,05
D	0,0	2,5	0,01

A Figura 50 mostra a tela de interface com o usuário do controlador de rotação do motor hidráulico.

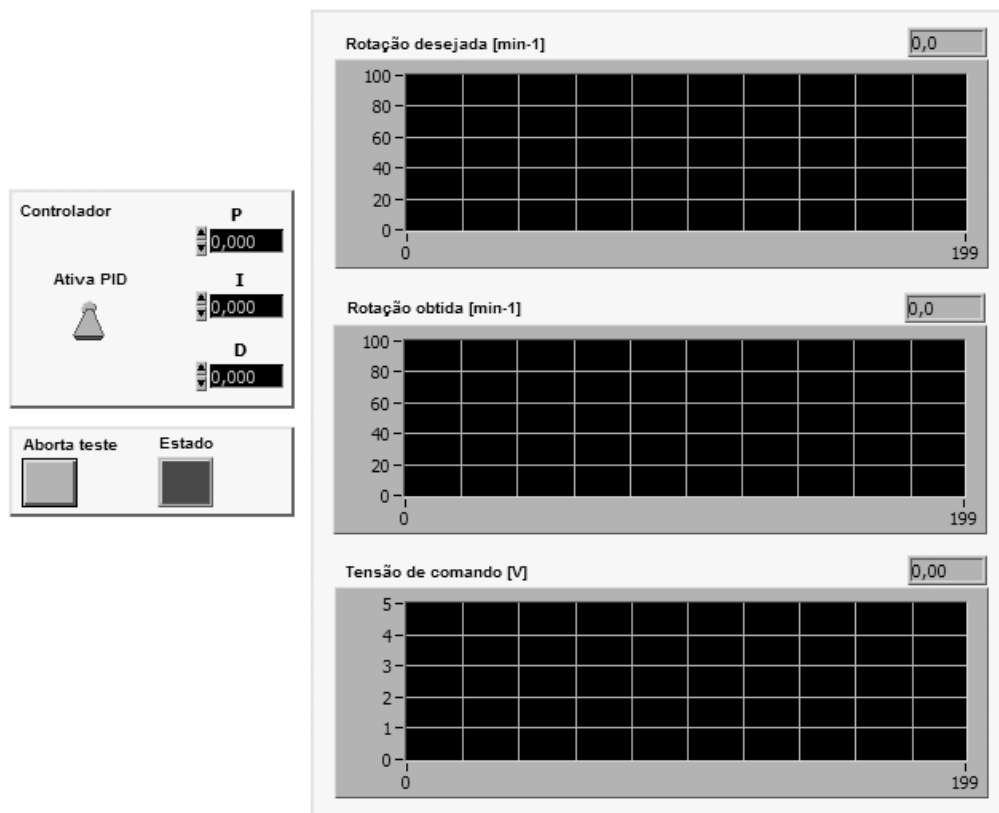


Figura 50 – Tela de interface com o usuário do controlador de rotação do motor hidráulico, implementado com o LabVIEW

Na implementação do controlador PID com o LabVIEW criou-se uma interface com o usuário que possibilita a observação, de forma gráfica, do comportamento das variáveis de entrada e saída. Foram disponibilizados gráficos da rotação desejada, rotação obtida (ambos em min^{-1}) e também o gráfico da tensão de comando, todos em relação ao tempo.

4.2.3 Leitura da posição geo-referenciada e da velocidade de deslocamento

O receptor de GPS utilizado foi configurado para enviar as sentenças denominadas GLL e VTG no padrão serial RS-232C, com *baud rate* de 4800 bps, sem paridade, oito bits, por uma de suas portas seriais, denominada B. O sinal de posicionamento RS-232C gerado pelo receptor de GPS foi transmitido por um cabo blindado até a entrada serial (COM1) do microcomputador. Foi desenvolvida uma rotina para leitura e decodificação do sinal de

posicionamento. O aplicativo desenvolvido tem a capacidade de rejeitar as sentenças que não sejam do tipo GLL e VTG.

A Figura 51 mostra o fluxograma do aplicativo para leitura da posição e velocidade de deslocamento a partir de um sinal serial fornecido por um receptor GPS.

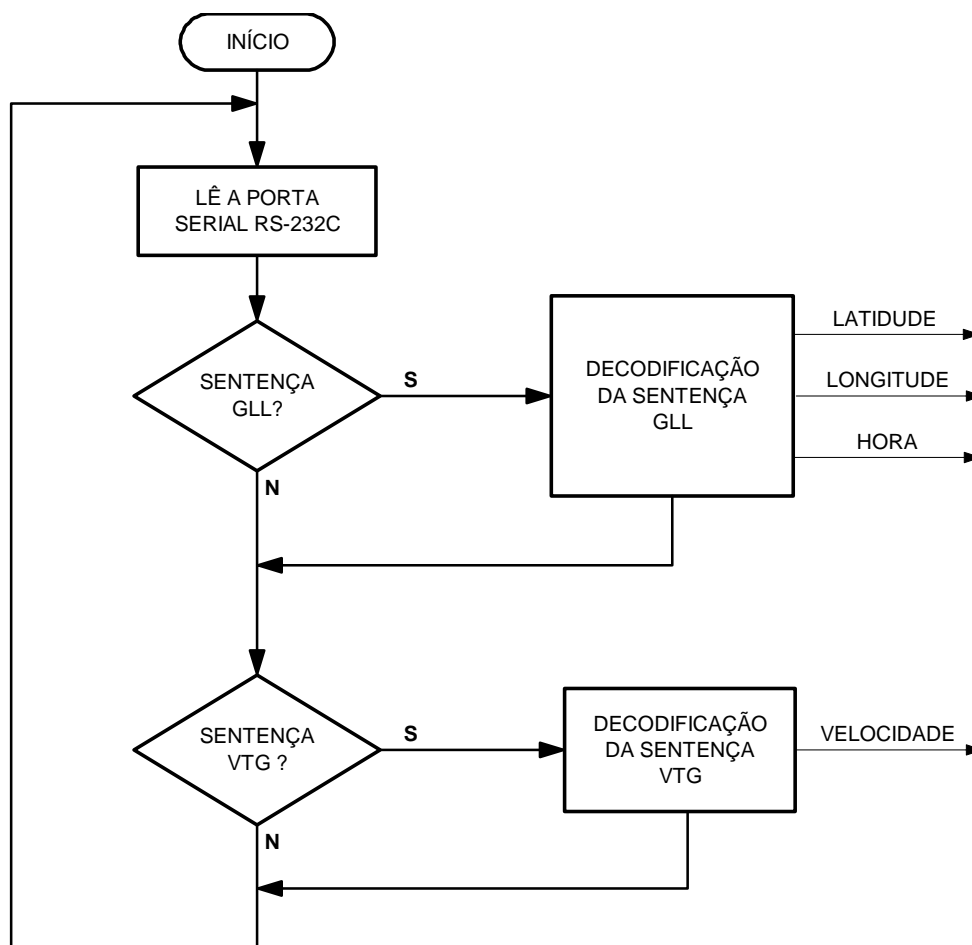


Figura 51 – Fluxograma do aplicativo para leitura da posição e velocidade de deslocamento

O aplicativo foi desenvolvido utilizando-se componentes do LabVIEW, tais como: configuração de porta serial, leitura de porta serial, manipulação de *strings*, contadores, temporizadores, elementos gráficos, etc. A taxa de repetição do aplicativo é de um hertz, em sincronismo com a taxa de envio de informações pelo receptor GPS utilizado no trabalho, que é de uma sentença completa por segundo. A Figura 52 mostra a tela de visualização do aplicativo desenvolvido para leitura da posição e velocidade de deslocamento.

Sentença NMEA

\$GPGSV,3,09,28,15,210,47*4E
\$GPZDA,184258.00,27,03,2003,00,00*63
\$GPRMC,,V,0000.0000,S,00000.0000,W,,,,,*05
\$GPGLL,0000.0000,S,00000.0000,W,,V*32
\$GPGGA,,0000.0000,S,00000.0000,W,0,01,,0.0,M,,,*7D
\$GPGSA,A,1,,,,,,,,,28,,,,,*14
\$GPVTG,,T,,M,N,,K*4E
\$GPGSV,3,1,09,01,21,018,,04,15,334,,07,37,276,,08,41,188,*71
\$GPGSV,3,2,09,11,39,122,,13,46,343,,20,16,045,,27,64,160,*7A

Latitude

Dir.

Longitude

Dir.

Hora Univ

Veloc. [km/h]

0.0000000

0.0000000

0

0

Figura 52 – Tela de visualização do aplicativo para leitura da posição geo-referenciada e velocidade de deslocamento, a partir do GPS

A Figura 53 mostra o diagrama funcional do aplicativo desenvolvido para leitura da posição geo-referenciada e velocidade de deslocamento do equipamento, a partir de sentenças NMEA, geradas por um GPS. Algumas informações retiradas das sentenças NMEA não foram utilizadas, tais como: TMG⁴⁸, velocidade em nós, etc.

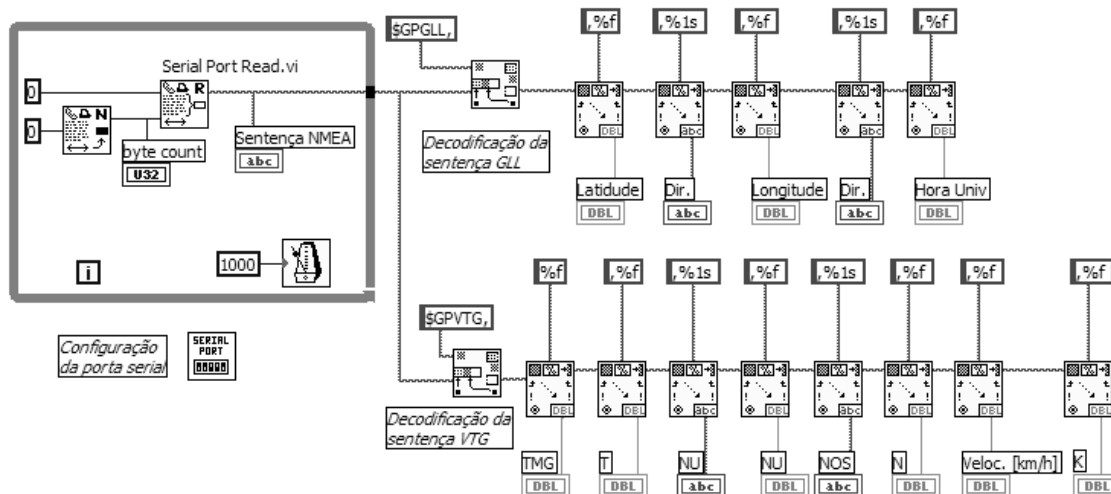


Figura 53 – Diagrama funcional do aplicativo desenvolvido para a leitura da posição e velocidade de deslocamento a partir do GPS.

⁴⁸ TMG: Track Made Good.

4.2.4 Aplicativo para realização dos testes iniciais

Para a realização dos testes iniciais do equipamento, desenvolveu-se com o LabVIEW um aplicativo específico. O aplicativo desenvolvido permite controlar a rotação da bomba e ainda selecionar a tensão de comando para cada um dos amplificadores PWM. Através do aplicativo pode-se medir a rotação instantânea de cada um dos eixos de acionamento dos dosadores. A Figura 54 mostra a tela do aplicativo desenvolvido para a realização dos testes iniciais do equipamento.

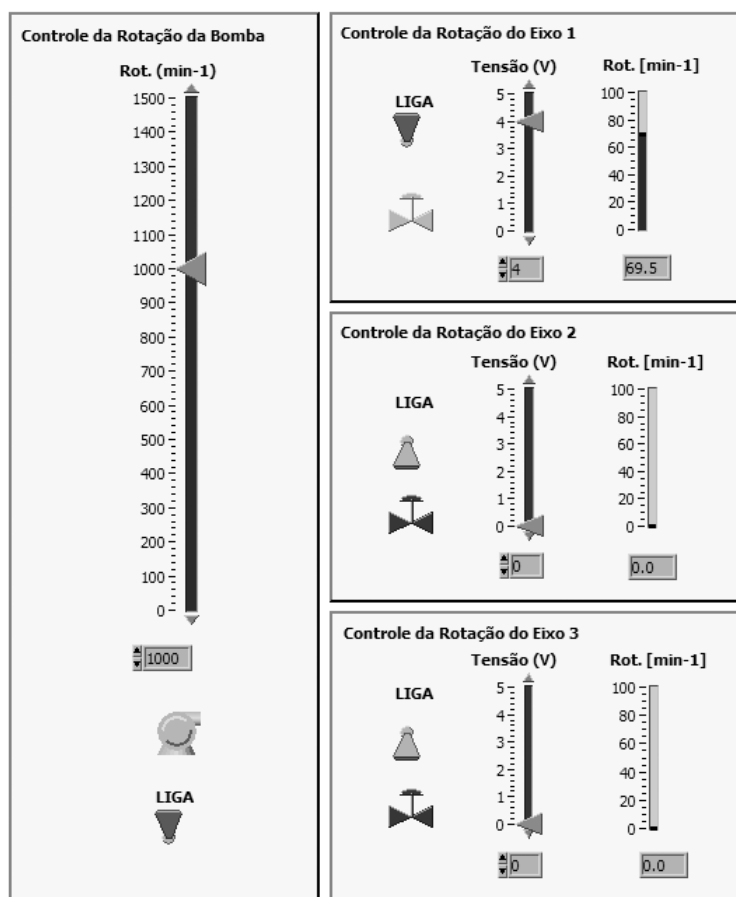


Figura 54 – Tela do aplicativo para a realização dos testes iniciais do equipamento

A Figura 55 mostra o diagrama funcional do aplicativo para a realização dos testes iniciais. Como é necessário gerar quatro sinais analógicos: três para controle do sinal de acionamento dos amplificadores PWM e outro para controle da rotação da bomba, é necessário se utilizar dois cartões DAQCard 1200, pois cada um deles possui dois canais analógicos de saída.

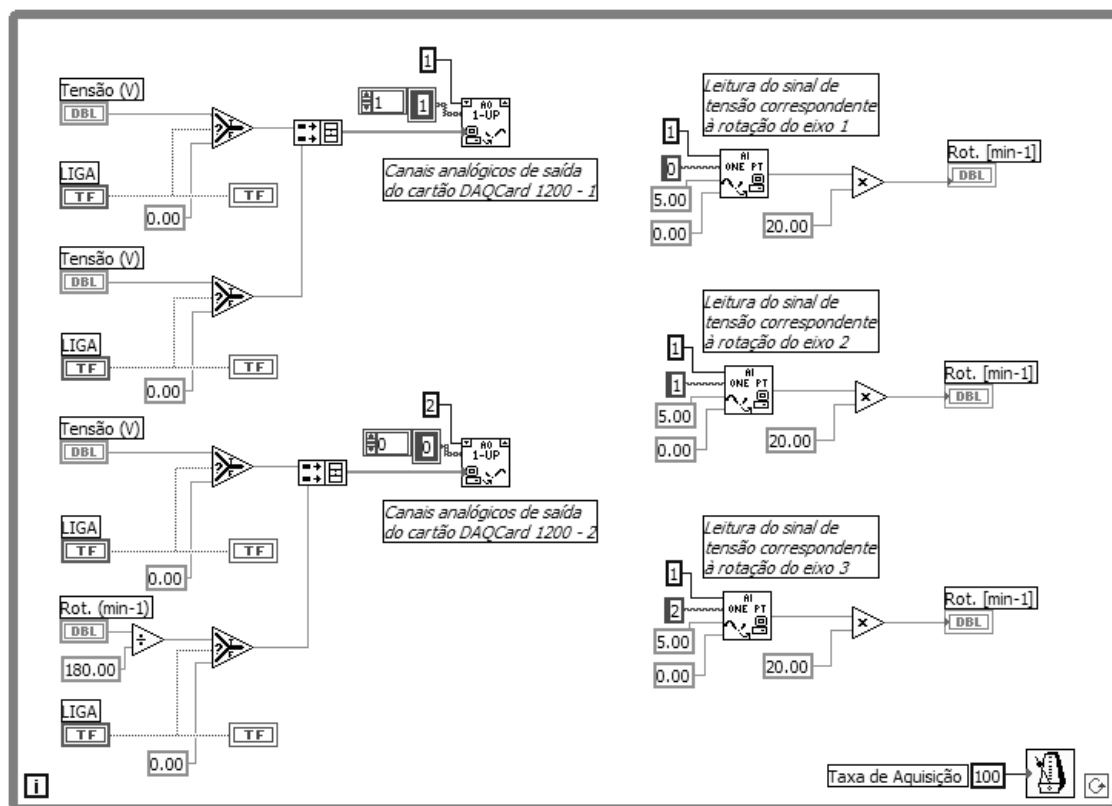


Figura 55 – Diagrama funcional do aplicativo desenvolvido para a realização dos testes iniciais

A partir do êxito dos testes iniciais do sistema, desenvolveu-se um aplicativo mais completo com a incorporação de rotinas que permitiram a operação do sistema tanto em malha fechada, quanto em malha aberta. Uma outra característica importante do aplicativo é a possibilidade da leitura de um arquivo de dados contendo um sinal de controle do motor hidráulico ou da bomba hidráulica. A Figura 56 mostra o aspecto da interface com o usuário do aplicativo desenvolvido. A Figura 57 mostra o correspondente diagrama funcional do aplicativo desenvolvido para o controle do equipamento.

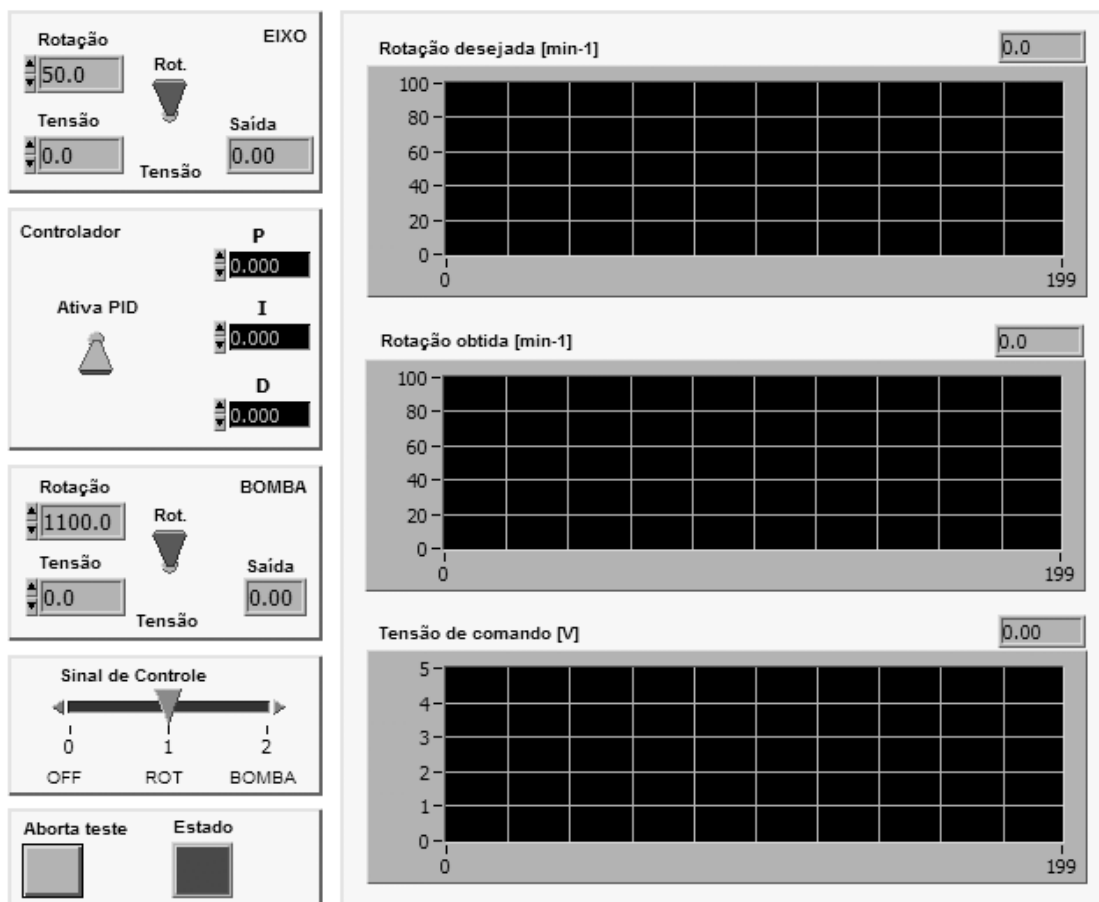


Figura 56 – Tela do programa para teste e avaliação do equipamento

Novamente pode-se notar a presença de gráficos para observação do comportamento dos sinais de entrada e saída do controlador. Nota-se também elementos (chaves, controles, etc.) para operação do sistema durante os testes.

rotação. Pode-se selecionar, individualmente, o valor desejado (*setpoint*) em unidades de rotação (min^{-1}) ou em tensão (V) para cada um dos eixos.

4.3 Avaliação Inicial do Equipamento

Inicialmente testou-se o equipamento com o objetivo de verificar a necessidade de um controlador de rotação. No equipamento desenvolvido é de extrema importância a manutenção da rotação correta em cada um dos eixos. Para se avaliar o comportamento da saída em função de um sinal elétrico de comando, realizou-se um teste estático que consistiu na aplicação de sinais de tensão constante, na faixa de 0,5 a 5 volts e na correspondente medição da rotação do eixo do motor, após a sua estabilização.

4.3.1 Testes estáticos para o eixo 1

A Tabela 1 apresenta os dados dos testes estáticos para o eixo 1. São apresentados os valores de rotação para um regime crescente e um regime decrescente de rotação. São apresentados também os valores médios entre os valores do regime crescente e decrescente de rotação, para cada tensão de comando. Analisando os dados da Tabela 1 fica evidente a ocorrência do fenômeno da histerese.

Tabela 1 – Resultados dos testes estáticos avaliando a rotação do eixo 1 em função da tensão de comando

Tensão de comando [V]	Rotação do eixo [min ⁻¹]		
	Regime crescente	Regime decrescente	Média
0,5	0,5	2,2	1,3
1,0	8,9	15,0	11,9
1,5	19,1	25,7	22,4
2,0	29,4	35,0	32,2
2,5	38,6	44,9	41,8
3,0	48,5	55,0	51,8
3,5	58,7	65,7	62,2
4,0	69,7	76,0	72,8
4,5	81,4	85,8	83,6
5,0	94,4	94,4	94,4

A partir dos resultados obtidos pode-se escrever a equação da reta que melhor ajusta a rotação do eixo em função da tensão de comando. Para o eixo 1, a relação entre a tensão de comando e a rotação do eixo obteve uma correlação de 0,9999 e é dada pela Equação 9.

$$Rot.do\ eixo[min^{-1}] = 20,496.Tensão\ de\ comando[V] - 8,926 \quad Equação\ 9$$

A Figura 58 mostra o gráfico do comportamento da rotação do eixo em função da tensão de comando.

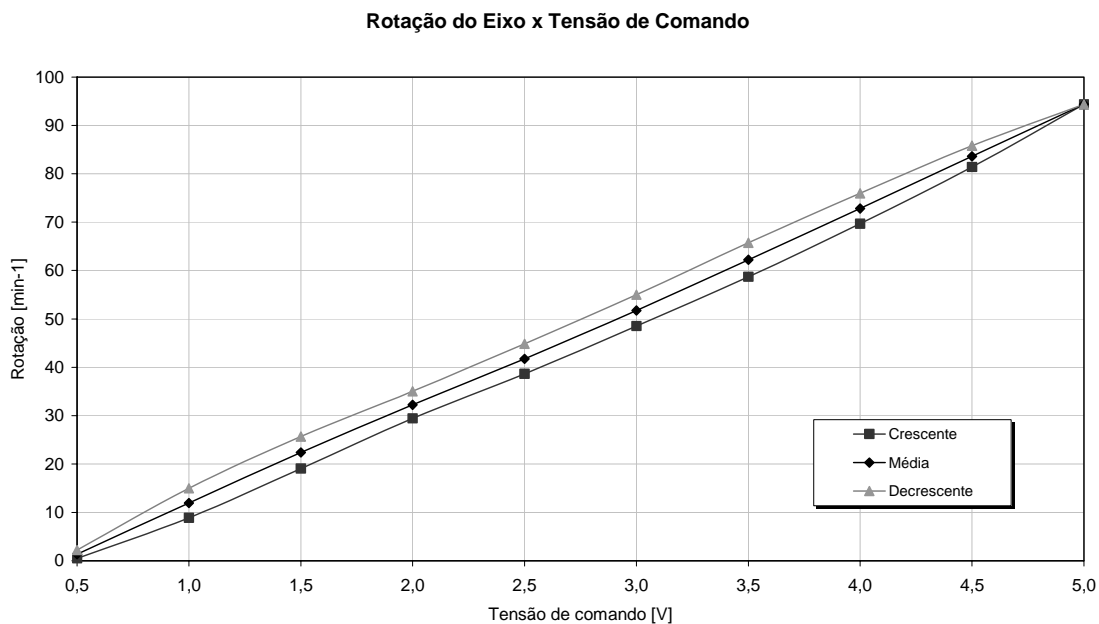


Figura 58 – Comportamento da rotação do eixo 1 em função da tensão de comando

Pela análise dos resultados obtidos conclui-se que a rotação do eixo é proporcional à tensão de comando. Com uma tensão de comando de cinco volts, a máxima rotação obtida foi de $94,4 \text{ min}^{-1}$ e com uma tensão de 0,5 volt a rotação do motor é praticamente nula (valor médio de $1,3 \text{ min}^{-1}$).

4.3.2 Testes estáticos para o eixo 2

A Tabela 2 apresenta os dados dos testes estáticos para o eixo 2. São apresentados os valores de rotação para um regime crescente e um regime decrescente de rotação. São apresentados também os valores médios entre os valores do regime crescente e decrescente de rotação, para cada tensão de comando. Analisando os dados da Tabela 2 fica evidente a ocorrência do fenômeno da histerese.

Tabela 2 – Resultados dos testes estáticos avaliando a rotação do eixo 2 em função da tensão de comando

Tensão de comando [V]	Rotação do eixo [min ⁻¹]		
	Regime crescente	Regime decrescente	Média
0,5	0,5	1,4	0,9
1,0	10,1	16,2	13,2
1,5	20,0	28,1	24,0
2,0	30,7	39,1	34,9
2,5	41,1	50,2	45,6
3,0	51,9	60,4	56,2
3,5	63,7	70,9	67,3
4,0	74,6	81,8	78,2
4,5	86,3	90,9	88,6
5,0	98,2	98,2	98,2

A partir dos resultados obtidos pode-se escrever a equação da reta que melhor ajusta a rotação do eixo em função da tensão de comando. Para o eixo 2, a relação entre a tensão de comando e a rotação do eixo obteve uma correlação de 0,9998 e é dada pela Equação 10.

$$Rot.do\ eixo [min^{-1}] = 21,604.Tensão\ de\ comando [V] - 8,694 \quad \text{Equação 10}$$

A Figura 59 mostra o gráfico do comportamento da rotação do eixo em função da tensão de comando.

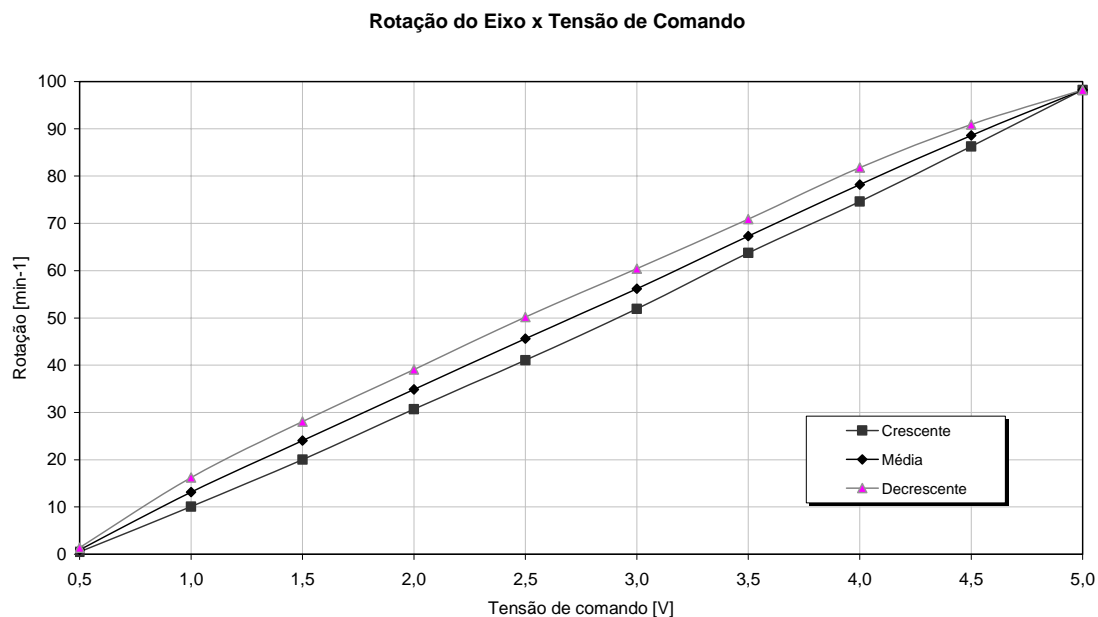


Figura 59 – Comportamento da rotação do eixo 2 em função da tensão de comando

Pela análise dos resultados obtidos conclui-se que a rotação do eixo é proporcional à tensão de comando. Com uma tensão de comando de cinco volts, a máxima rotação obtida foi de $98,2 \text{ min}^{-1}$ e com uma tensão de 0,5 volt a rotação do motor é praticamente nula (valor médio de $0,9 \text{ min}^{-1}$).

4.3.3 Testes estáticos para o eixo 3

A Tabela 3 apresenta os dados dos testes estáticos para o eixo 3. São apresentados os valores de rotação para um regime crescente e um regime decrescente de rotação. São apresentados também os valores médios entre os valores do regime crescente e decrescente de rotação, para cada tensão de comando. Analisando os dados da Tabela 3 fica bastante evidente a ocorrência do fenômeno da histerese.

Tabela 3 – Resultados dos testes estáticos avaliando a rotação do eixo 3 em função da tensão de comando

Tensão de comando [V]	Rotação do eixo [min ⁻¹]		
	Regime crescente	Regime decrescente	Média
0,5	0,8	1,9	1,4
1,0	12,0	17,3	14,6
1,5	22,2	29,1	25,6
2,0	32,7	39,6	36,2
2,5	43,2	49,8	46,5
3,0	52,5	59,0	55,8
3,5	62,2	68,8	65,5
4,0	72,2	78,8	75,5
4,5	82,9	87,7	85,3
5,0	93,8	93,8	93,8

A partir dos resultados obtidos pode-se escrever a equação da reta que melhor ajusta a rotação do eixo em função da tensão de comando. Para o eixo 3, a relação entre a tensão de comando e a rotação do eixo obteve uma correlação de 0,9989 e é dada pela Equação 11.

$$Rot.do\ eixo [min^{-1}] = 20,280.Tensão\ de\ comando [V] - 5,760 \quad \text{Equação 11}$$

A Figura 60 mostra o gráfico do comportamento da rotação do eixo em função da tensão de comando.

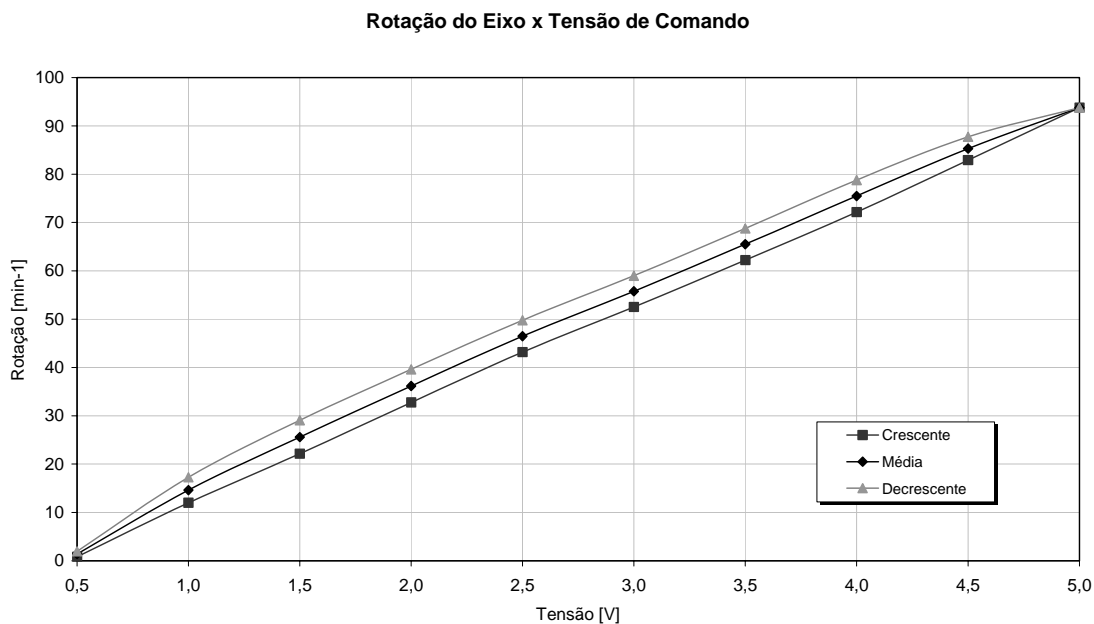


Figura 60 – Comportamento da rotação do eixo 3 em função da tensão de comando

Pela análise dos resultados obtidos conclui-se que a rotação do eixo é proporcional à tensão de comando. Com uma tensão de comando de cinco volts, a máxima rotação obtida foi de $93,8 \text{ min}^{-1}$ e com uma tensão de 0,5 volt a rotação do motor é praticamente nula (valor médio de $1,4 \text{ min}^{-1}$).

4.3.4 Comparação dos testes estáticos para os três eixos

O comportamento da rotação em função da tensão de comando é similar para os três eixos do equipamento. Para os três eixos nota-se claramente um comportamento linear em função da tensão de comando, porém com a existência do fenômeno de histerese. A Figura 61 mostra graficamente um comparativo da rotação dos três eixos em função da tensão de comando, calculadas utilizando as respectivas equações de calibração de cada um dos eixos.

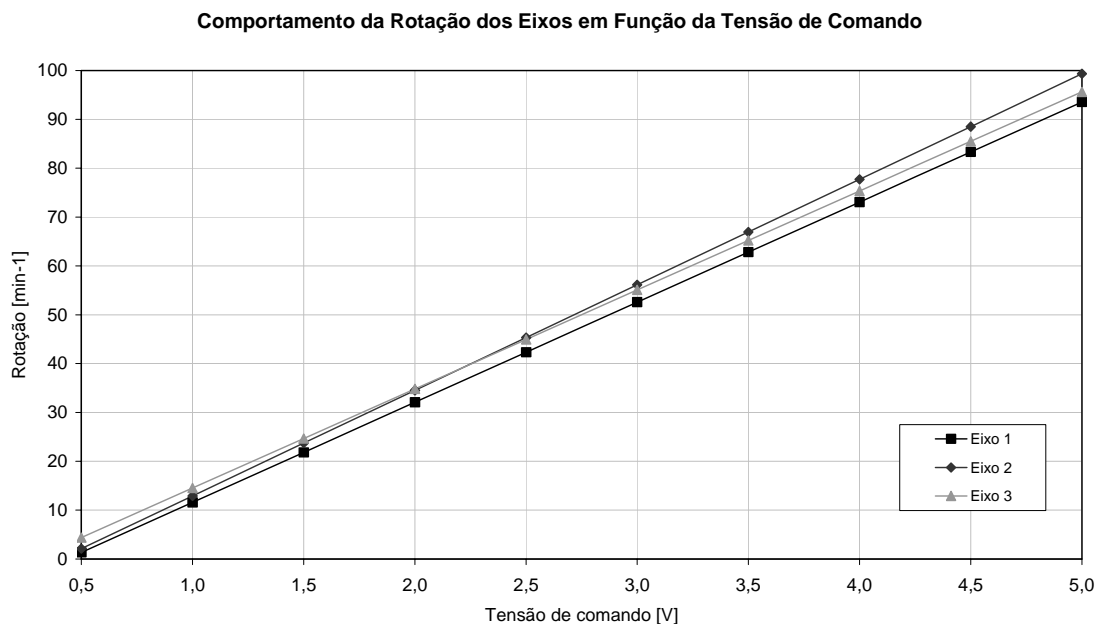


Figura 61 – Comparativo entre o comportamento da rotação dos três eixos em função da tensão de comando

Os testes simularam comportamento do equipamento em situações de trabalho em campo. Foram simulados diversos comportamentos da quantidade de fertilizantes, correspondendo a alterações de prescrição segundo os mapas e, também, segundo uma variação de velocidade do equipamento. Nota-se claramente a ocorrência do fenômeno de histerese, o que dificulta a implementação do controlador.

4.4 Controlador de Rotação em Malha Aberta

Nos gráficos resultantes dos testes, normalizou-se o sinal de controle em função da rotação do eixo, de modo que um sinal de zero volt corresponde ao eixo parado e um sinal de cinco volts corresponde ao eixo em sua rotação máxima (100 min^{-1}). Foi necessário este procedimento para que se pudesse calcular o tempo de atraso e o erro em regime estacionário do sistema. Desta maneira, para cada um dos testes, apresenta-se dois gráficos de resultados: o primeiro apresenta o sinal de comando em volts e a rotação do eixo, enquanto que um segundo

gráfico, apresenta o sinal de comando em rotação e a respectiva rotação do eixo, de acordo com o critério de normalização descrito anteriormente.

4.4.1 Excitação do tipo degrau

Aplicando um sinal de teste do tipo degrau, como mostrado na Figura 30, obteve-se um comportamento da rotação do eixo como mostrado na Figura 62.

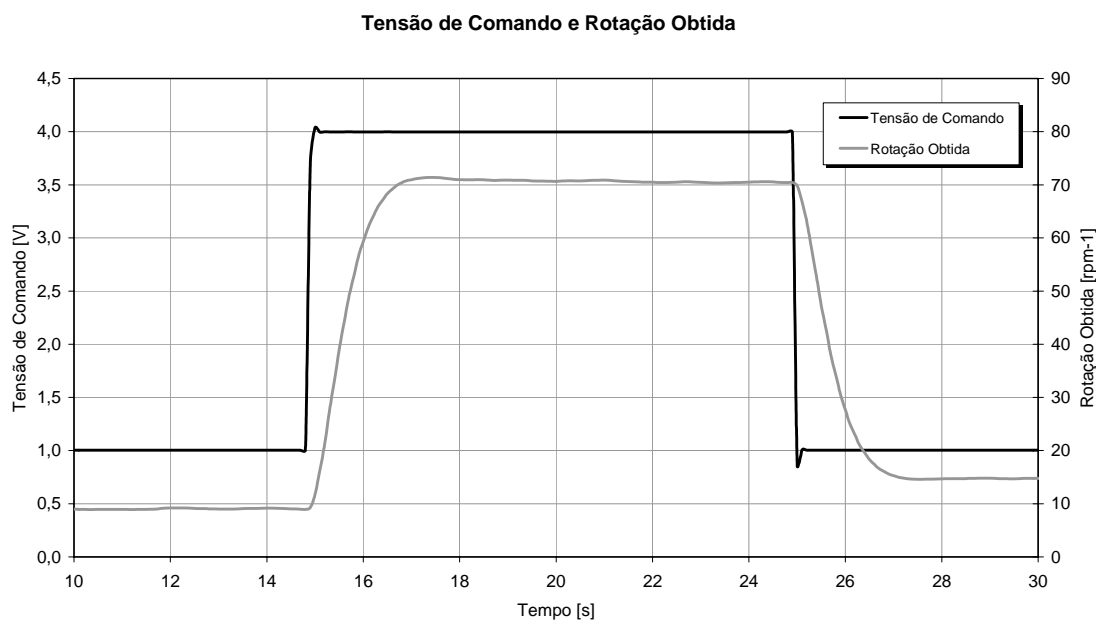


Figura 62 – Rotação obtida no eixo para um sinal de excitação do tipo degrau

A Figura 63 apresenta os resultados do teste do tipo degrau, com o sinal de teste transformado para valores de rotação através da utilização da equação de calibração do eixo 1 (Equação 9).

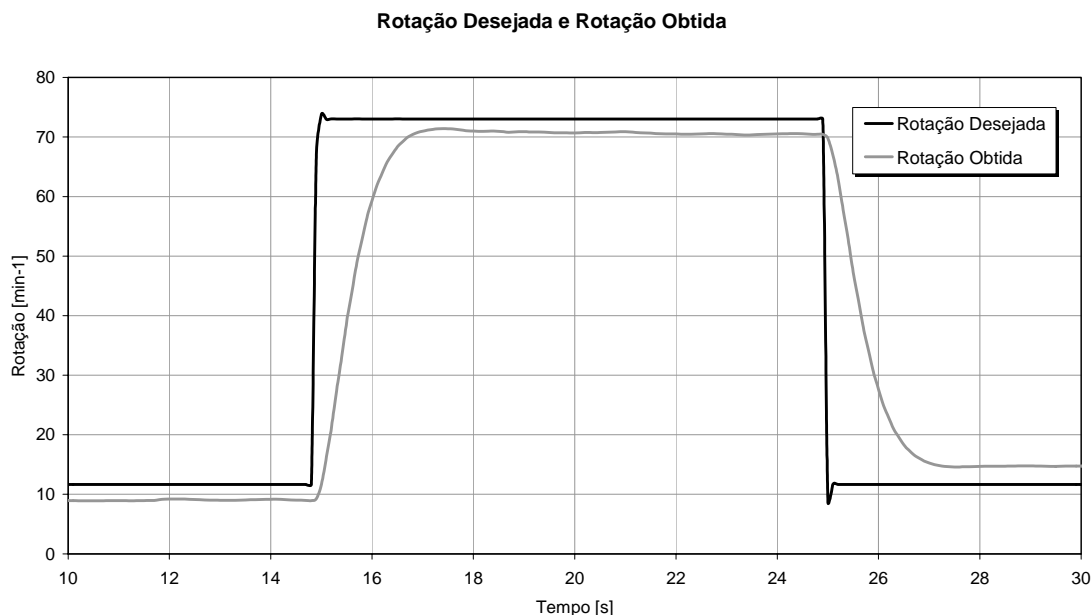


Figura 63 – Rotação obtida no eixo para um sinal de excitação do tipo degrau, normalizado para a rotação

Pelos resultados obtidos com um sinal de teste do tipo degrau, pode-se concluir que a rotação do eixo não segue exatamente o sinal de comando como seria desejável. Claramente nota-se a ocorrência do fenômeno da histerese, fazendo com que a rotação, para uma mesma tensão de comando, seja diferente quando o motor se encontra num ciclo crescente de rotação do que quando o mesmo se encontra num ciclo decrescente. Através do resultado mostrado no gráfico da Figura 63, observa-se um erro no valor da rotação obtida em relação à rotação desejada de $-2,5 \text{ min}^{-1}$ no início do teste, $-2,5 \text{ min}^{-1}$ após a aplicação do degrau e de $3,1 \text{ min}^{-1}$ ao final do teste. O tempo de subida foi de aproximadamente 1,2 segundos e o tempo de descida de 1,1 segundos, considerando-se um critério de 10 a 90 %, normalmente empregado em sistemas sobreamortecidos.

4.4.2 Excitação do tipo degraus múltiplos

Aplicando um sinal de teste do tipo degraus múltiplos, como mostrado na Figura 32, obteve-se um comportamento da rotação do eixo como mostrado na Figura 64.

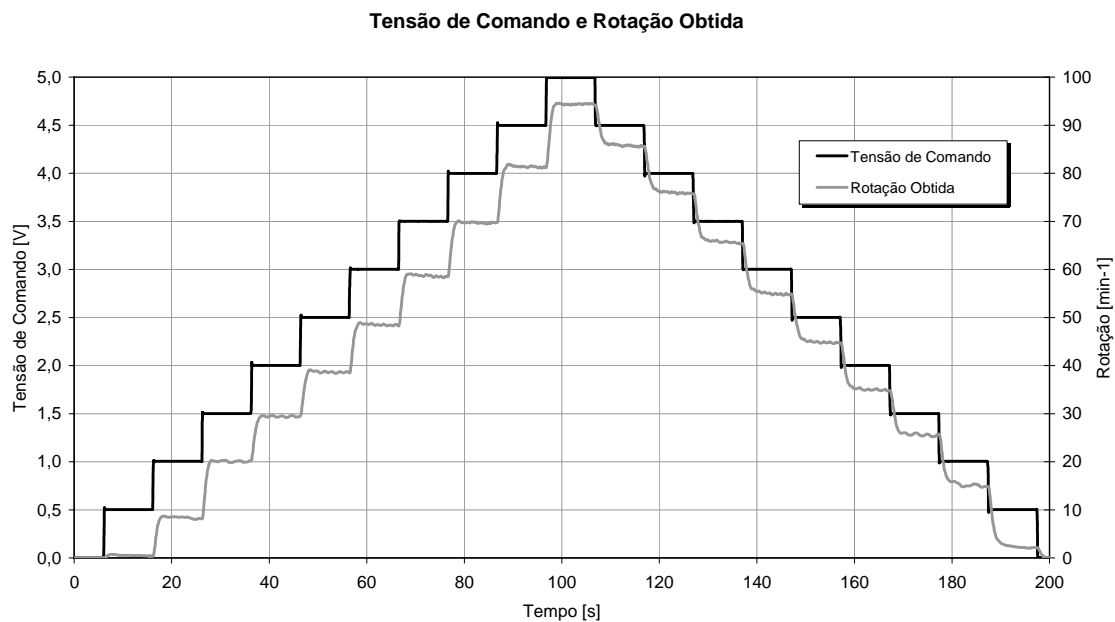


Figura 64 – Rotação obtida no eixo para um sinal de excitação do tipo degraus múltiplos

A Figura 65 apresenta os resultados do teste do tipo degrau, com o sinal de teste transformado para valores de rotação através da utilização da equação de calibração do eixo 1 (Equação 9).

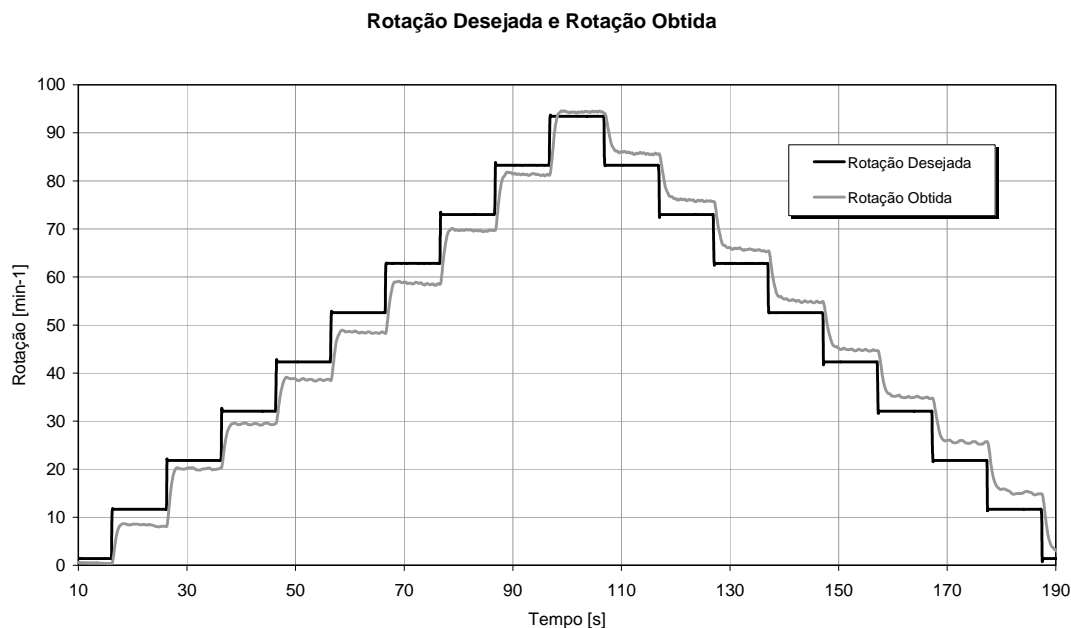


Figura 65 – Rotação obtida no eixo para um sinal de excitação do tipo degraus múltiplos, normalizado para a rotação

Observando-se o comportamento da rotação do eixo em função de um sinal de teste do tipo degraus múltiplos nota-se claramente o efeito negativo do fenômeno da histerese. A ocorrência desse fenômeno prejudica o funcionamento do sistema de controle de rotação do motor, pois não se pode garantir um valor preciso da rotação mediante a aplicação do sinal de controle.

4.4.3 Excitação do tipo rampa rápida

Aplicando um sinal de teste do tipo rampa rápida, como mostrado na Figura 34, obteve-se um comportamento da rotação do eixo como mostrado na Figura 66.

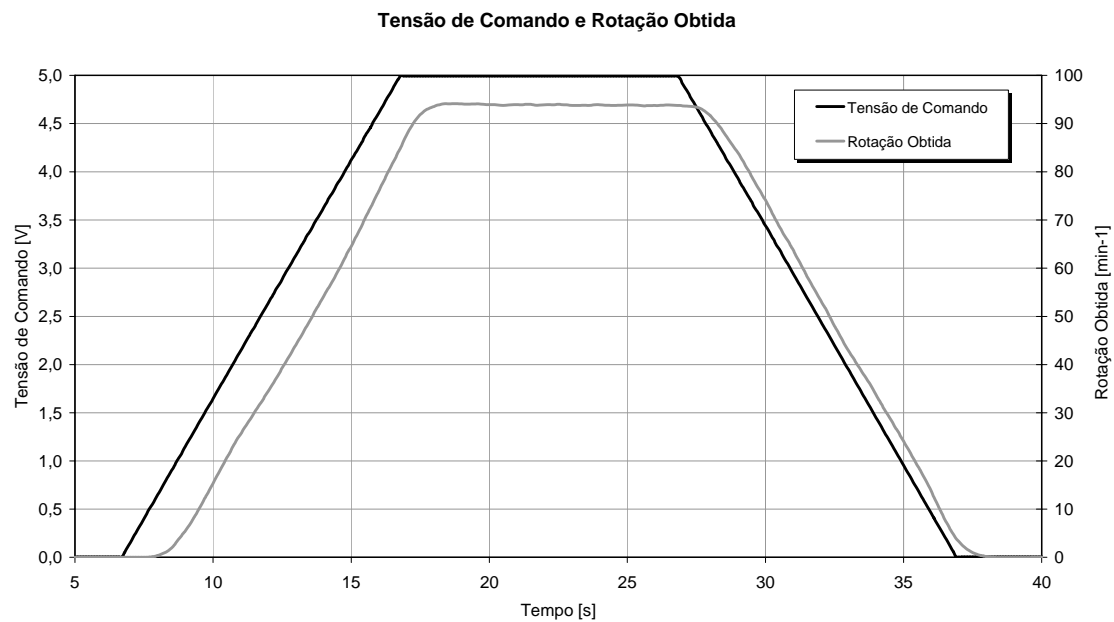


Figura 66 – Rotação obtida no eixo para um sinal de excitação do tipo rampa rápida

A Figura 67 apresenta os resultados do teste do tipo rampa rápida, com o sinal de teste transformado para valores de rotação através da utilização da equação de calibração do eixo 1 (Equação 9).

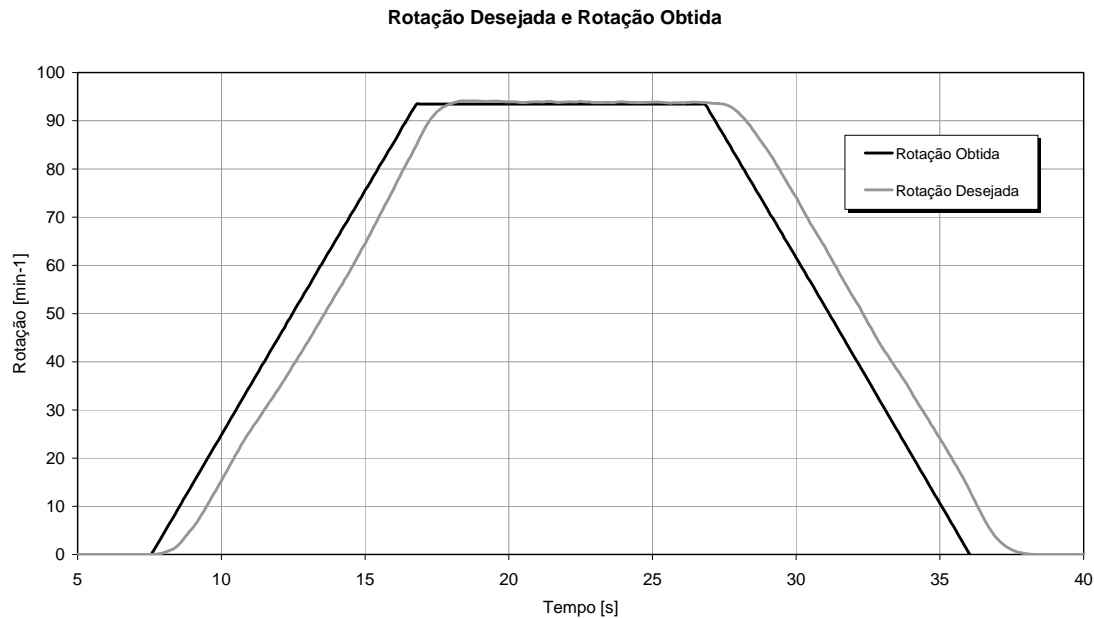


Figura 67 – Rotação obtida no eixo para um sinal de excitação do tipo rampa rápida, normalizado para a rotação

Analisando o gráfico da Figura 67 pode-se concluir que o comportamento da rotação é linear em relação ao sinal de controle. Conclui-se também que existe um atraso entre o sinal de controle e a rotação do eixo. Esse atraso é de aproximadamente 1,1 segundos considerando-se a rampa de subida e também de aproximadamente de 1,1 segundos considerando-se a rampa de descida. Com esse comportamento da saída (rotação do motor) em função de uma entrada do tipo rampa, observa-se o comportamento típico de um sistema classificado como do Tipo 1⁴⁹.

⁴⁹ Os sistemas do Tipo 1 caracterizam-se por possuírem um erro constante quando submetidos a uma entrada do tipo rampa. Isso resulta numa resposta também do tipo rampa, porém atrasada em relação à rampa de entrada.

4.4.4 Excitação do tipo rampa lenta

Aplicando um sinal de teste do tipo rampa lenta, como mostrado na Figura 36, obteve-se um comportamento da rotação do eixo como mostrado na Figura 68.

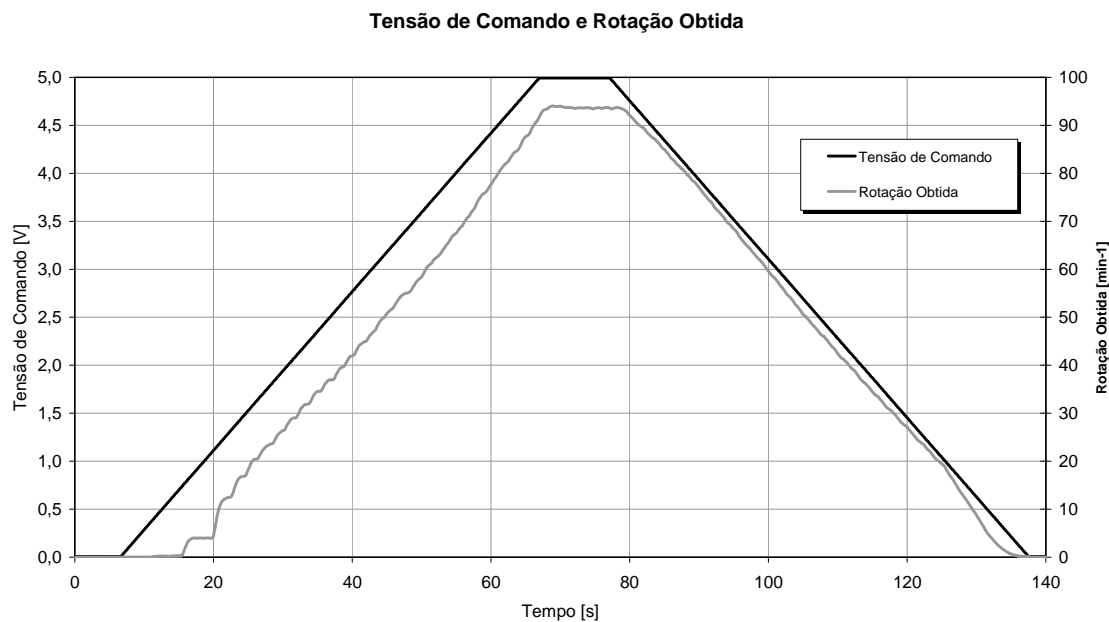


Figura 68 – Rotação obtida no eixo para um sinal de excitação do tipo rampa lenta

A Figura 69 apresenta os resultados do teste do tipo rampa lenta, com o sinal de teste transformado para valores de rotação através da utilização da equação de calibração do eixo 1 (Equação 9).

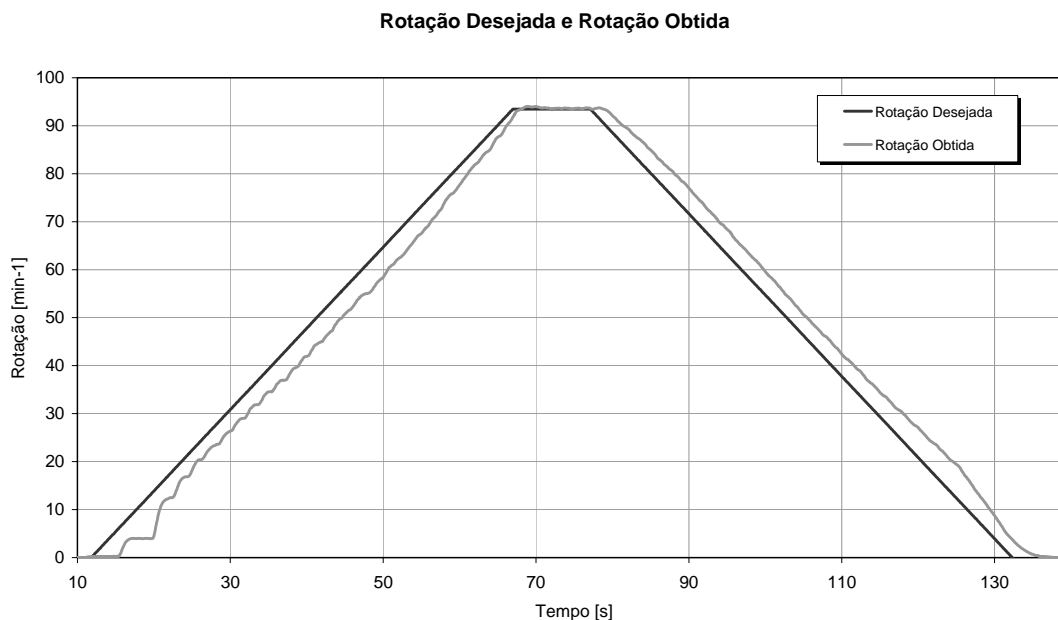


Figura 69 – Rotação obtida no eixo para um sinal de excitação do tipo rampa lenta, normalizado para a rotação

De maneira análoga ao teste com um sinal do tipo rampa rápida, o teste com um sinal do tipo rampa lenta mostrou que o comportamento da rotação é linear em relação ao sinal de controle. Mostrou ainda que existe um atraso entre o sinal de controle e a rotação do eixo, sendo esse atraso ligeiramente superior ao existente quando se aplica um sinal de teste do tipo rampa rápida. Esse atraso é de aproximadamente 3 segundos considerando-se a rampa de subida e de aproximadamente 2,6 segundos considerando-se a rampa de descida. Com esse comportamento da saída (rotação do motor) em função de uma entrada do tipo rampa, novamente observa-se o comportamento típico de um sistema classificado como do Tipo 1.

4.4.5 Excitação do tipo rampas múltiplas

Aplicando um sinal de teste do tipo rampas múltiplas, como mostrado na Figura 38, obteve-se um comportamento da rotação do eixo como mostrado na Figura 70.

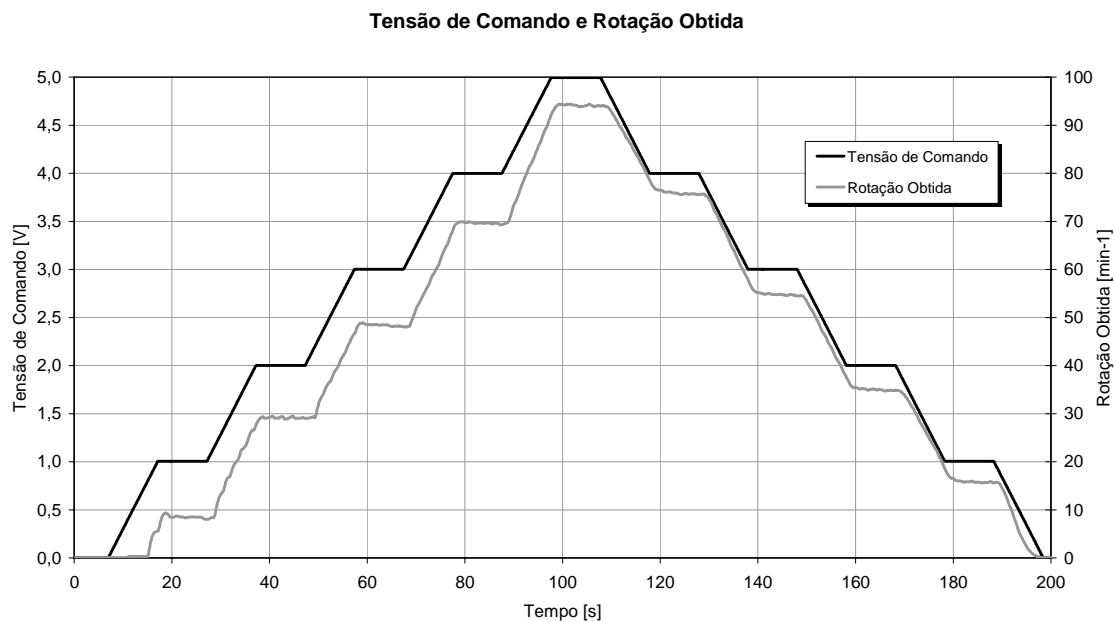


Figura 70 – Rotação obtida no eixo para um sinal de excitação do tipo rampas múltiplas

A Figura 71 apresenta os resultados do teste do tipo rampas múltiplas, com o sinal de teste transformado para valores de rotação através da utilização da equação de calibração do eixo 1 (Equação 9).

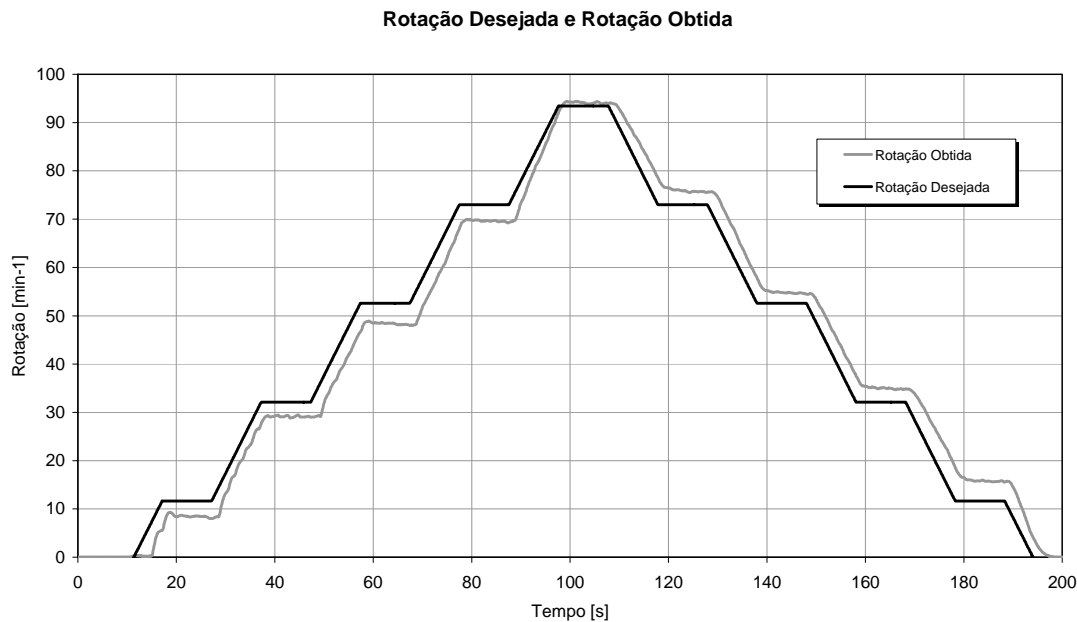


Figura 71 – Rotação obtida no eixo para um sinal de excitação do tipo rampas múltiplas, normalizado para a rotação

Observando-se o comportamento da rotação do eixo em função de um sinal de excitação do tipo rampas múltiplas, nota-se uma combinação dos fenômenos ocorridos quando da aplicação do sinal de excitação do tipo degraus múltiplos e do tipo rampa rápida. Ou seja, nota-se a presença de histerese e de atraso na saída (rotação) em relação ao sinal de excitação. Caso esse sistema, em malha aberta, fosse utilizado para o controle da rotação dos dosadores, certamente ocorreriam dosagens e formulações incorretas dos fertilizantes.

4.4.6 Avaliação da interdependência da rotação dos motores

Devido à configuração em série do circuito hidráulico do equipamento, existe a possibilidade de que o funcionamento de um motor afete o funcionamento dos demais. OLIVA et al. (2001) concluíram que, para um regime contínuo de rotação, não existe interdependência entre os dosadores do equipamento. Com o propósito de se avaliar a interdependência da rotação dos motores hidráulicos, quando submetidos a solicitações

dinâmicas, foram realizados alguns experimentos. Um dos testes realizados foi a avaliação do comportamento da rotação do eixo 2, enquanto o motor hidráulico de acionamento do eixo 1 era submetido a uma solicitação do tipo degrau na (Figura 30), para mudança de sua velocidade. A Figura 72 mostra a rotação desejada no eixo 1 e a rotação obtida no eixo 2.

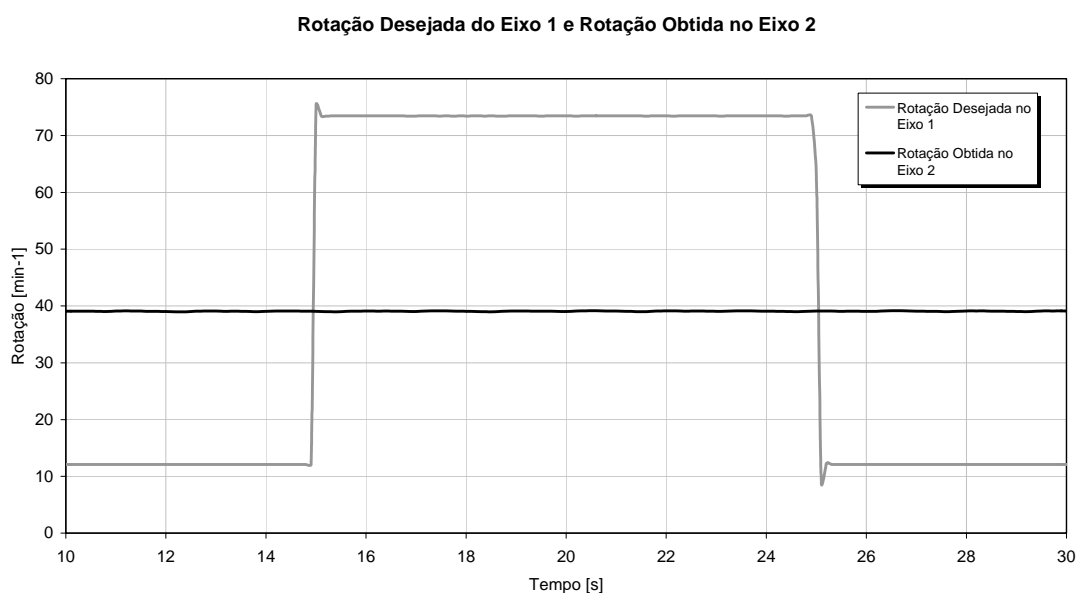


Figura 72 – Rotação desejada do eixo 1 e rotação obtida do eixo 2

Analisando-se o comportamento da rotação do eixo 2, mostrada na Figura 72, visualmente nota-se que não existe alteração no comportamento de sua rotação quando o eixo 1 é submetido à solicitações bruscas de alteração de rotação.

Pode-se concluir que é suficiente, para o controle adequado do equipamento, que cada um dos controladores opere de forma independente. Cada um dos controladores deve receber um sinal de comando, medir a rotação e atuar em somente em um dos motores.

4.4.7 Comportamento do sistema em função do aquecimento do óleo

Uma característica não desejada, porém bastante usual, de sistemas hidráulicos é a alteração de seu comportamento em função da temperatura do óleo hidráulico. OLIVA et al.

(2001) realizaram testes para determinação do comportamento da rotação dos motores em função do aquecimento do óleo hidráulico mantendo-se uma tensão de comando fixa, concluindo que existe uma ligeira tendência de aumento da rotação dos eixos com o aumento da temperatura do óleo hidráulico.

Além dos testes estáticos, descritos por OLIVA et al. (2001), foram realizados testes dinâmicos para avaliação do comportamento do sistema em função do aquecimento do óleo hidráulico. Para tanto foram realizados dois experimentos utilizando-se um sinal de teste do tipo degraus múltiplos. O primeiro deles foi realizado com o óleo hidráulico à uma temperatura de 46 °C e o segundo com o óleo aquecido a uma temperatura de 72 °C. Os resultados dos dois testes estão apresentados na Figura 73. Para efeito de simplificação são mostrados somente os resultados obtidos nos testes do eixo 1.

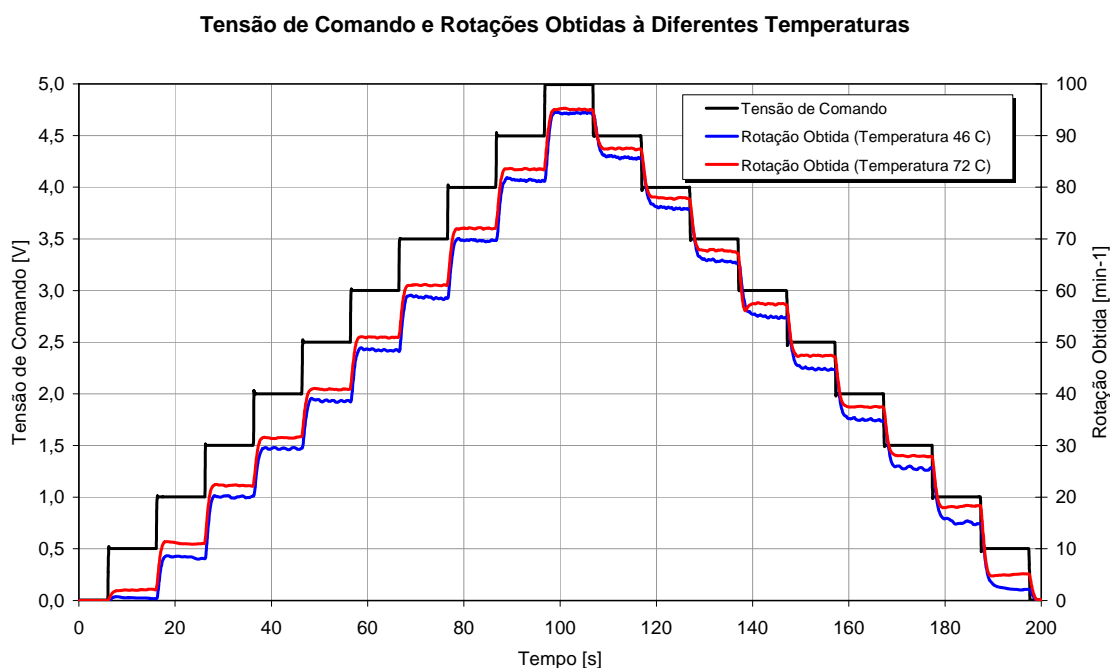


Figura 73 – Comportamento da rotação do motor com o aquecimento do óleo

Analisando-se o comportamento da rotação do eixo 1, em função do aumento da temperatura, nota-se claramente que existe uma tendência de elevação da rotação. Esse comportamento pode prejudicar seriamente a precisão do sistema se o mesmo estiver operando

em malha aberta, pois uma mesma tensão de comando pode resultar em diferentes rotações do eixo, dependendo da temperatura do óleo hidráulico. Pode-se notar na Figura 73 que para uma tensão de comando de cinco volts, a rotação obtida é praticamente a mesma, tanto para o óleo à temperatura de 46 °C, como para com o óleo à 72 °C. Esse fenômeno ocorre porque a rotação máxima nesse caso é limitada pela vazão máxima de óleo, que por sua vez depende da rotação da bomba hidráulica.

A Figura 74 apresenta os resultados dos testes dinâmicos para avaliação do comportamento do sistema em função do aquecimento do óleo hidráulico, com o sinal de teste normalizado para rotação, segundo a equação de calibração do eixo 1 (Equação 9).

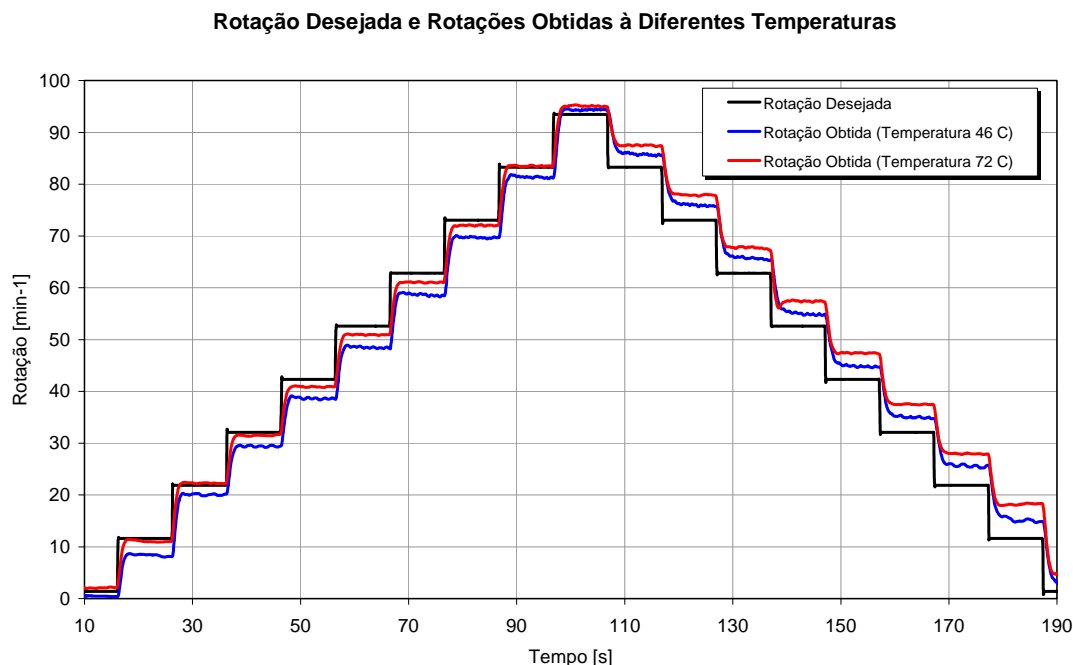


Figura 74 – Rotação desejada e rotação obtida à diferentes temperaturas

Observa-se que para valores crescentes de solicitação, a rotação obtida se manteve em níveis inferiores aos desejados, enquanto que para valores decrescentes de solicitação, a rotação obtida se manteve em níveis superiores aos desejados.

4.4.8 Flutuação na rotação da bomba

Com o objetivo de se avaliar uma possível influência da rotação da bomba sobre a rotação do motor, realizou-se uma série de quatro testes, onde o sinal de comando de rotação dos eixos foi mantido em um nível constante, enquanto variou-se, significativamente, a rotação da bomba. A rotação inicial foi de aproximadamente 1307 min^{-1} (valor nominal), sendo então reduzida, segundo uma função senoidal, até um mínimo de aproximadamente 1178 min^{-1} , correspondendo a uma variação de aproximadamente 10 % em relação à rotação nominal. A escolha de uma redução de 10 % no valor da rotação da bomba é justificável, pois em uma operação de campo a bomba será acionada pela tomada de potência de um trator agrícola. Um fato a ser observado é que o motor diesel empregado nos tratores agrícolas possui um governador que permite uma queda de aproximadamente 7 % na rotação do motor, na faixa de rotação governada. A Figura 75 mostra curva de flutuação na rotação da bomba hidráulica utilizada nos testes.

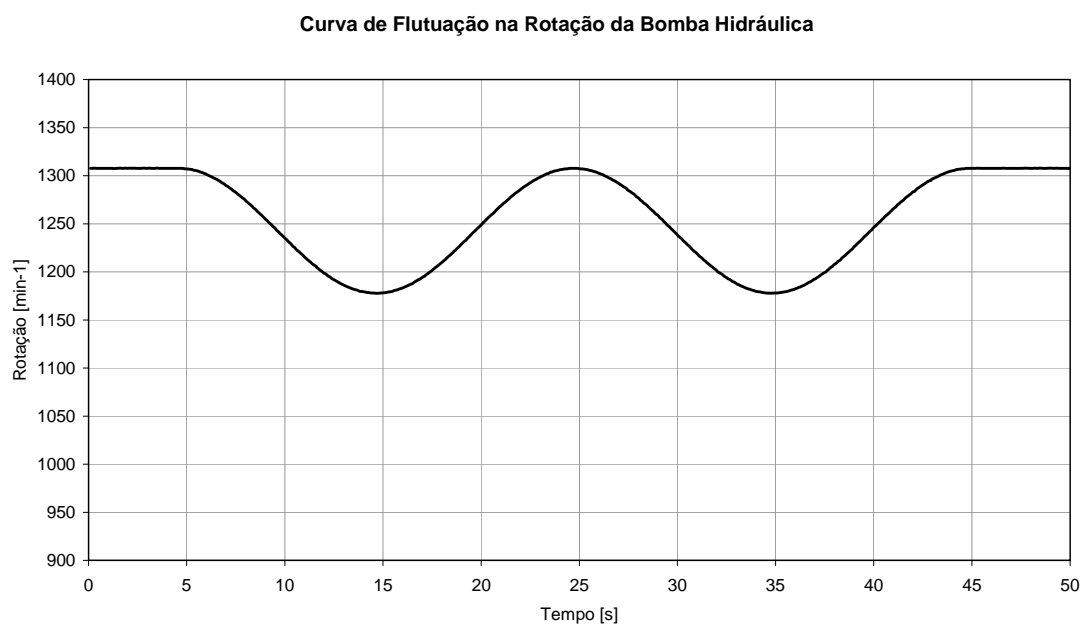


Figura 75 – Curva de flutuação na rotação da bomba hidráulica

Ressalta-se que o equipamento, em condições operacionais, é acionado através da tomada de potência (TDP) de um trator agrícola. Normalmente, a tomada de potência de um trator agrícola é acionada mecanicamente através do motor do trator, resultante do

acoplamento mecânico fornecido por uma caixa de engrenagens. Fica evidente então que qualquer flutuação na rotação do motor é imediatamente refletida em uma flutuação proporcional na rotação da tomada de potência do trator.

Rotação desejada de 40 min⁻¹

Neste teste, o sistema operou em malha aberta, e a rotação de comando foi mantida em 40 min⁻¹. A Figura 76 mostra os resultados do teste para avaliação dos efeitos de uma flutuação na rotação da bomba, onde pode se observar a variação na rotação da bomba, a rotação desejada e a rotação obtida no eixo analisado.

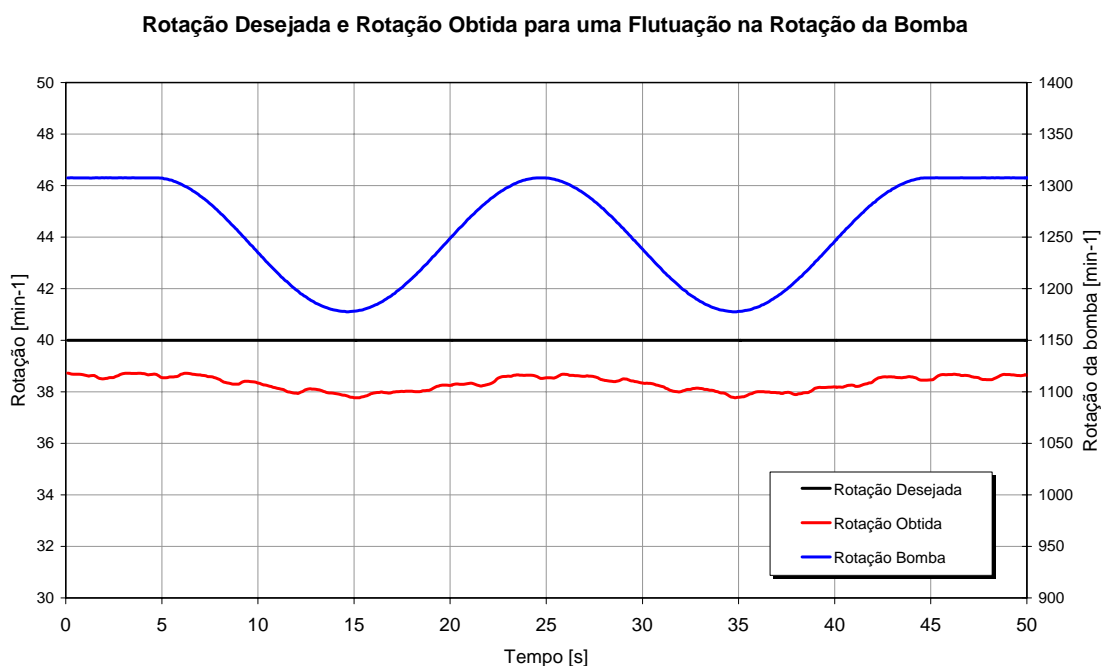


Figura 76 – Rotação desejada e rotação obtida em função de uma flutuação na rotação da bomba, para a rotação desejada de 40 min⁻¹

Nota-se pelo comportamento observado na Figura 76 que a rotação do eixo sofreu uma queda de aproximadamente 1 min⁻¹, que ocorreu quando a bomba operou na menor rotação. Isso corresponde a uma queda de 2,5 % em relação à rotação inicial do eixo.

Rotação desejada de 75 min⁻¹

Neste teste, o sistema operou em malha aberta, e a rotação de comando foi mantida em 75 min⁻¹. A Figura 77 mostra os resultados do teste para avaliação dos efeitos de uma flutuação na rotação da bomba, onde pode se observar a variação na rotação da bomba, a rotação desejada e a rotação obtida no eixo analisado.

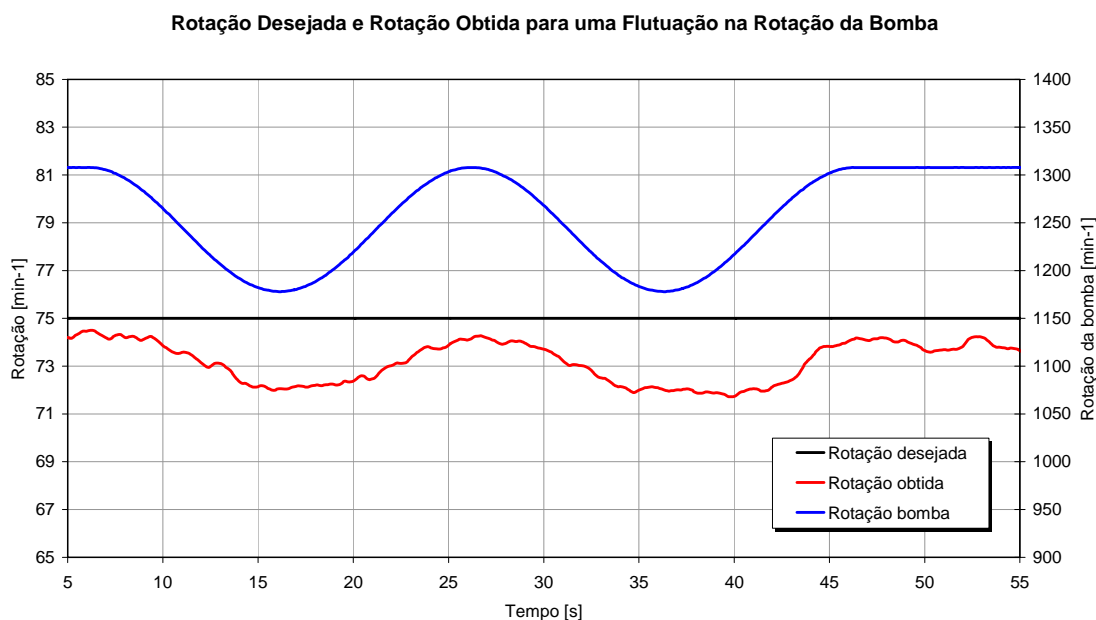


Figura 77 – Rotação desejada e rotação obtida em função de uma flutuação na rotação da bomba, para a rotação desejada de 75 min⁻¹

Nota-se pelo comportamento observado na Figura 77 que a rotação do eixo sofreu uma diminuição de aproximadamente 2,7 min⁻¹ em relação à rotação inicial, que ocorreu quando a bomba operou na menor rotação. Isso corresponde a uma queda de 3,6 % em relação à rotação inicial do eixo.

Rotação desejada de 95 min⁻¹

Neste teste, o sistema operou em malha aberta, e a rotação de comando foi mantida em 95 min⁻¹. A Figura 78 mostra os resultados do teste para avaliação dos efeitos de uma

flutuação na rotação da bomba, onde pode-se observar a variação na rotação da bomba, a rotação desejada e a rotação obtida no eixo analisado.

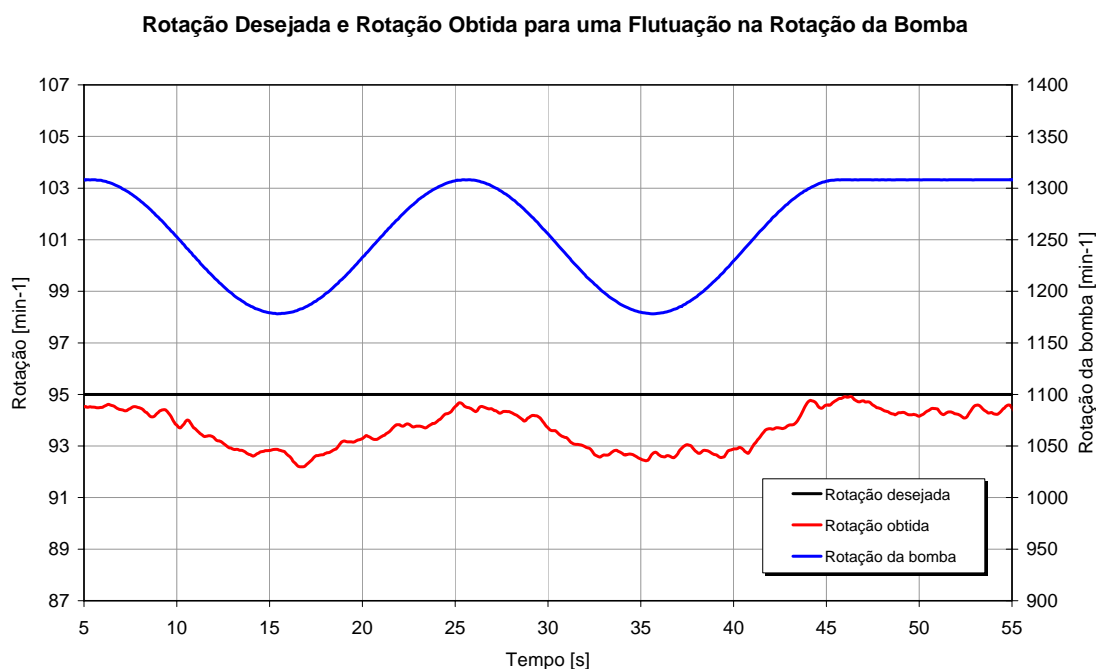


Figura 78 – Rotação desejada e rotação obtida em função de uma flutuação na rotação da bomba, para a rotação desejada de 95 min^{-1}

Nota-se pelo comportamento observado na Figura 78 que a rotação do eixo sofreu uma diminuição de aproximadamente $2,6 \text{ min}^{-1}$ em relação à rotação inicial, que ocorreu quando a bomba operou na menor rotação. Isso corresponde a uma queda de 2,7 % em relação à rotação inicial do eixo.

4.5 Controlador de Rotação em Malha Fechada

Diante das deficiências observadas no controlador de rotação em malha aberta, implementou-se um controlador do tipo PID para o controle da rotação em sistema de malha fechada. Uma das dificuldades para a implementação de um controlador PID é a especificação dos seus parâmetros (ganhos proporcional, integral e derivativo) iniciais.

Neste trabalho, utilizou-se a metodologia proposta por Ziegler e Nichols para ajustagem de controladores PID. Uma das vantagens da utilização da metodologia de Ziegler-Nichols é a não necessidade da obtenção do modelo matemático do sistema. A seguir implementou-se e testou-se controladores dos tipos P, PI e PID com os parâmetros obtidos experimentalmente. Finalmente, procedeu-se experimentalmente um ajuste fino nos parâmetros do controlador PID.

4.5.1 Aplicação da metodologia de Ziegler-Nichols

Durante os testes realizados para o ajuste do controlador PID, observou-se que o sistema de controle de rotação do motor hidráulico se torna instável com a elevação do ganho proporcional (K_p). Desta forma é praticável a aplicação do segundo método de Ziegler-Nichols para ajustagem de controladores PID, válido para sistemas que se desestabilizam com um ganho de realimentação.

Realizou-se um teste com a aplicação de um sinal de excitação contínuo, correspondente a uma rotação de aproximadamente 50 min^{-1} . Desabilitou-se as ações integral e derivativa do controlador, através da atribuição de valores zero para os parâmetro I e D. Aumentou-se lentamente o valor do parâmetro referente ao ganho proporcional até que o comportamento da rotação do eixo de acionamento começasse a apresentar uma oscilação sustentada, o que ocorreu para um ganho K_p de 4,5. A Figura 79 mostra o comportamento da rotação do eixo de acionamento na situação de oscilação sustentada.

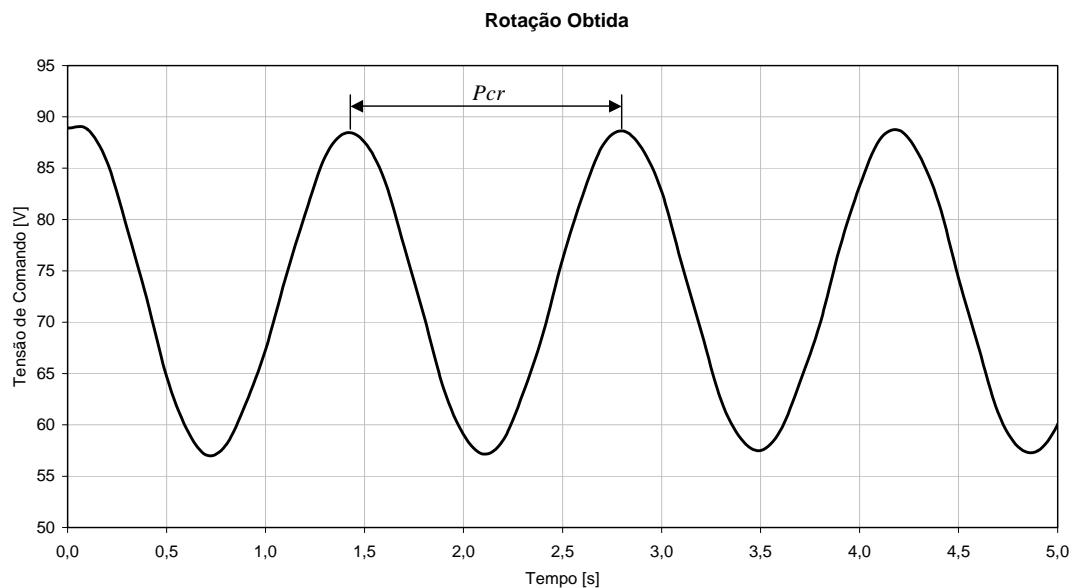


Figura 79 – Resultado do teste para determinação dos parâmetros do controlador segundo a metodologia de Ziegler-Nichols

Do comportamento da rotação quando na situação de oscilação sustentada (Figura 79), obtém-se o valor de 1,4 segundos para o período crítico (P_{cr}). A partir dos valores de K_{cr} e de P_{cr} pode-se calcular os valores dos parâmetros do controlador PID a partir do Quadro 5, cujos valores são relacionados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros do controlador PID segundo a metodologia de Ziegler-Nichols

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	2,25	∞	0
PI	2,025	1,68	0
PID	2,7	0,7	0,175

Nota-se que os valores dos parâmetros do controlador PID apresentados na Tabela 4 estão em valores de tempo integral (T_i) e tempo derivativo (T_d). Porém, devido à implementação do controlador adotada nesse trabalho, é impreterível que os parâmetros dos

controladores estejam na forma de ganhos. Portanto, pode-se empregar a Equação 12 para se transformar o tempo integral (T_i) em um valor equivalente de ganho integral (K_i) e, a Equação 13 para se obter um ganho derivativo (K_d), a partir do tempo derivativo (T_d).

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad \text{Equação 12}$$

$$K_d = K_p \cdot T_d \quad \text{Equação 13}$$

A Tabela 5 mostra os valores de ganhos para o controlador PID segundo os critérios estabelecidos por Ziegler-Nichols.

Tabela 5 – Parâmetros do controlador PID segundo a metodologia de Ziegler-Nichols, em valores de ganho

Controlador	K_p	K_i	K_d
P	2,250	0	0
PI	2,025	1,205	0
PID	2,700	3,857	0,473

4.5.2 Implementação do Controlador P, segundo Ziegler-Nichols

Nesta fase, implementou-se um sistema de controle utilizando somente controlador Proporcional (P). Como o controlador implementado permite incrementos de 0,1 para o valor do ganho proporcional, adotou-se $K_p = 2,3$.

Para avaliação do ajuste do controlador, utilizou-se um sinal de teste do tipo degraus múltiplos. A escolha deste tipo de sinal de teste foi devido à facilidade para verificação dos efeitos de erro em regime permanente e histerese. A Figura 80 mostra o resultado dos testes com o controlador proporcional, quando submetido a uma entrada do tipo degraus múltiplos

(Figura 33). Nesse teste, limitou-se a rotação desejada a um máximo de 90 min^{-1} , devido às limitações impostas pelos ajustes da vazão do sistema hidráulico.

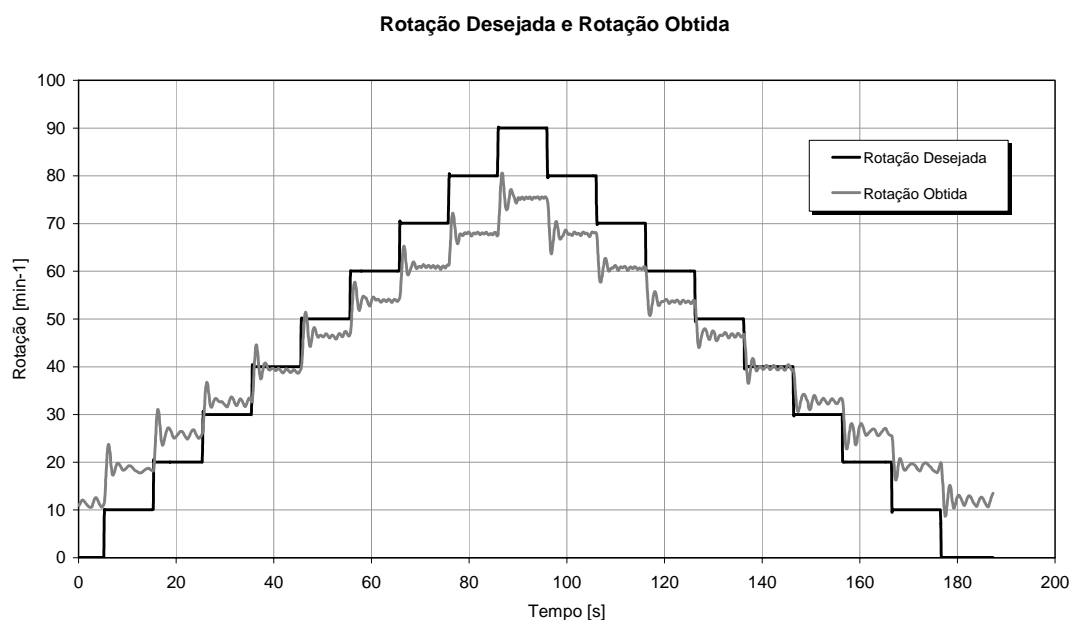


Figura 80 – Comportamento da rotação do motor, para um sinal de excitação do tipo degraus múltiplos, com um controlador Proporcional (P)

Com a introdução de um controlador proporcional no sistema, notou-se uma melhora no tempo de subida e no tempo de atraso quando comparado com sistema em malha aberta (Figura 65). Com a introdução do controlador proporcional praticamente eliminou-se o efeito da histerese.

Porém, o sistema se tornou mais oscilatório, passando a apresentar elevados valores de sobre sinal e um maior tempo de acomodação, não atendendo às necessidades do projeto. Este comportamento observado é característico de controladores proporcionais.

Nota-se ainda que em baixos regimes de rotação, a rotação obtida no eixo foi superior à rotação desejada. Já para níveis elevados de rotação o comportamento se inverte, ou seja, a rotação obtida no eixo foi inferior à rotação desejada. Como era de se esperar, o uso apenas de um controlador proporcional não foi suficiente para se eliminar o erro em regime permanente.

4.5.3 Implementação do Controlador PI, segundo Ziegler-Nichols

Com o propósito de reduzir o erro estacionário, implementou-se um controlador Proporcional + Integral (PI). Como o controlador implementado permite incrementos de 0,1 no valor do ganho proporcional e incrementos de 0,05 no ganho integral, adotou-se $K_p = 2,0$ e $K_i = 1,20$.

O sinal de teste utilizado foi o do tipo degraus múltiplos (Figura 33). Nesse teste, limitou-se a rotação desejada a um máximo de 90 min^{-1} , devido às limitações impostas pelos ajustes do sistema hidráulico. A Figura 81 mostra os resultados dos testes realizados com o controlador Proporcional + Integral (PI).

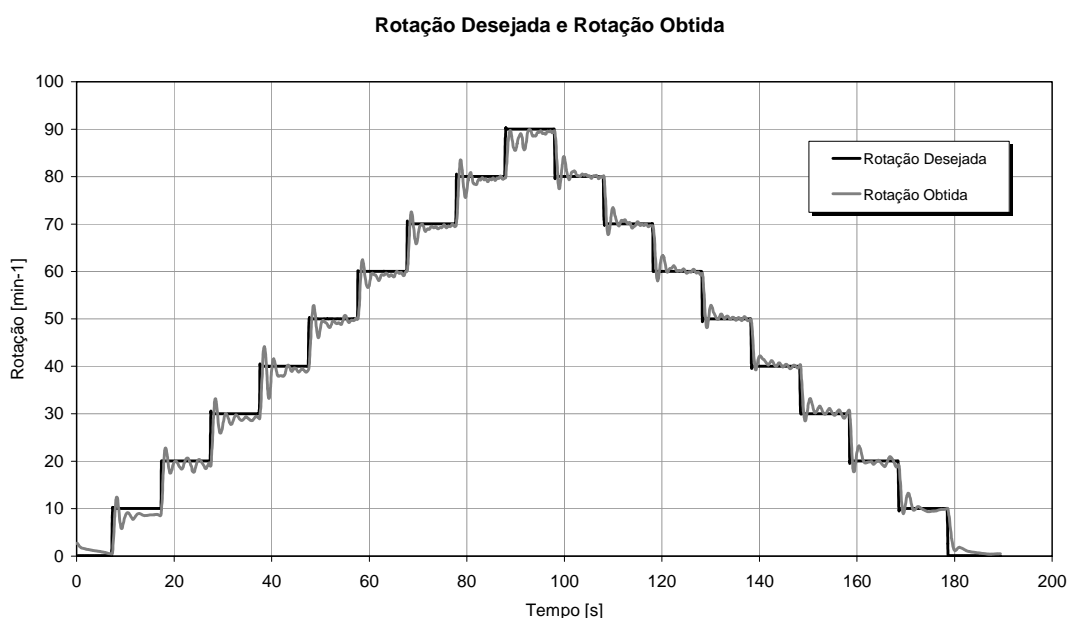


Figura 81 – Comportamento da rotação do motor, para um sinal de excitação do tipo degraus múltiplos, com um controlador Proporcional + Integral (PI)

Com a introdução de um controlador integral ao controlador proporcional existente, notou-se que o erro em regime permanente foi drasticamente reduzido quando comparado com o sistema com um controlador proporcional. Com a utilização do controlador Proporcional +

Integral (PI), também praticamente se eliminou o fenômeno da histerese. Observou-se que, com os parâmetros escolhidos, o erro estacionário foi reduzido à níveis aceitáveis para a aplicação desenvolvida. Contudo, o sobresinal e o tempo de acomodação ainda permanecem muito elevados, o que indica a necessidade da adição de um controlador Derivativo (D).

4.5.4 Implementação do Controlador PID, segundo Ziegler-Nichols

Com a finalidade de diminuir o sobre sinal e tornar o sistema mais rápido, adicionou-se um controlador derivativo ao controlador Proporcional + Integral (PI) existente. Como o controlador implementado permite incrementos de 0,1 no valor do ganho proporcional, incrementos de 0,05 no ganho integral e incrementos de 0,01 no valor do ganho derivativo, adotou-se $K_p = 2,7$, $K_i = 3,90$ e $K_d = 0,47$.

O sinal de teste utilizado também foi o do tipo degraus múltiplos (Figura 33). Nesse teste, limitou-se a rotação desejada a um máximo de 90 min^{-1} , devido às limitações impostas pelos ajustes do sistema hidráulico. A Figura 82 mostra os resultados dos testes realizados com o controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID).

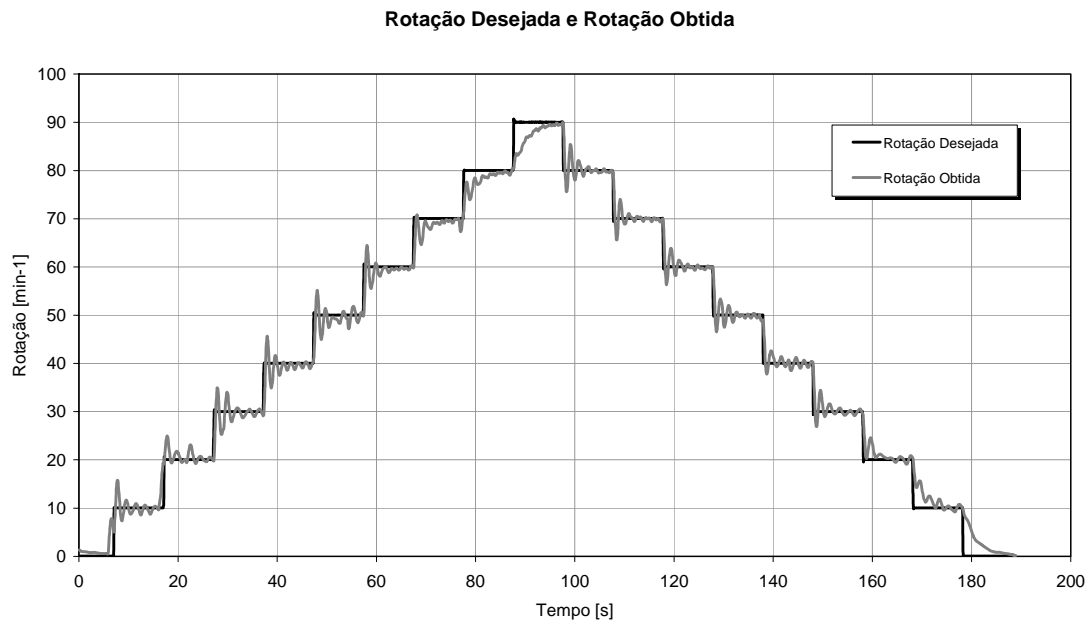


Figura 82 – Comportamento da rotação do motor, para um sinal de excitação do tipo degraus múltiplos, com um controlador Proporcional + Integral + Derivativo (PID)

Analisando-se os resultados dos testes notou-se que não ocorreram ganhos significativos em relação ao controlador Proporcional + Integral (PI) anteriormente adotado. A introdução de um controlador Derivativo (D), com parâmetros obtidos segundo a metodologia de Ziegler-Nichols, ao controlador PI já existente, deveria reduzir o sobresinal, porém, o que se verificou foi um aumento deste fenômeno. Tal fato pode ser explicado devido ao controlador derivativo não ser recomendado para sistemas sujeito à ruídos, como é o caso do estudado. Nestas situações, o controlador acaba acentuando os efeitos dos ruídos. Outra possibilidade é a de que os parâmetros obtidos, por meio da metodologia de Ziegler-Nichols, necessitem um ajuste fino para que se obtenha melhores resultados.

Pode-se concluir que pela metodologia proposta por Ziegler-Nichols obteve-se um conjunto de parâmetros K_p , K_i e K_d que possibilitaram a implementação de um sistema de controle que melhorou significativamente o funcionamento do sistema, quando comparado

com o sistema operando em malha aberta, porém, os resultados não foram totalmente satisfatórios, principalmente no quesito sobressinal.

4.5.5 Ajuste fino do Controlador PID

Como era esperado, o controlador obtido através da metodologia de Ziegler-Nichols, permitiu que o sistema operasse, porém, os resultados não foram satisfatórios. Optou-se então, por um procedimento de sintonia interativo. Ajustou-se manualmente cada um dos ganhos dos controladores, K_p , K_d e K_i de forma individual, procurando-se os valores combinados que fornecessem os melhores resultados ao controle da rotação do motor.

Para o ajuste fino do controlador PID utilizou-se o sinal de excitação do tipo degraus múltiplos (Figura 33), ajustando-se sistematicamente cada um dos parâmetros do controlador.

Inicialmente diminuiu-se o ganho derivativo (K_d) até que se conseguisse uma diminuição do sobressinal e no tempo de estabilização. A ação derivativa, quando utilizada em excesso pode conduzir o sistema a uma instabilidade. Reduziu-se também o valor do ganho integral (K_i) também com o objetivo de diminuir o sobressinal e o tempo de estabilização, porém garantindo uma manutenção de sua ação principal que é a de zerar o erro estacionário. O ganho proporcional (K_p) também sofreu redução visando uma diminuição do sobressinal.

Foram testados diversos conjuntos de parâmetros para o controlador PID, porém com $K_p = 2,1$, $K_i = 3,0$ e $K_d = 0,15$, conseguiu-se os melhores resultados, com uma diminuição do tempo de subida, sobressinal máximo e tempo de estabilização, com um erro estacionário nulo, em relação ao controlador PID com os parâmetros ajustados pela metodologia de Ziegler-Nichols.

Analisando-se os resultados do teste de degraus múltiplos para o controlador ajustado, verifica-se uma grande melhora no comportamento do sistema em relação ao sistema em malha aberta e, também em relação ao controlador com parâmetros obtidos através da metodologia de Ziegler-Nichols. O fenômeno da histerese foi completamente eliminado e os erros em regime permanente foram praticamente zerados. Com a realização de ajustes no controlador conseguiu-se uma redução no sobressinal e ainda uma melhora no tempo de subida

e do tempo de acomodação, em relação ao controlador com parâmetros obtidos através da metodologia de Ziegler-Nichols.

Observa-se que, mesmo com o controlador ajustado, o sistema não atingiu a rotação de 100 min^{-1} . Isto era esperado, pois tal limitação na rotação máxima é devido à vazão de óleo que se mostrou insuficiente para que o eixo do dosador atingisse tal rotação. Os testes limitaram-se então a uma rotação máxima de 90 min^{-1} .

Deve-se considerar que a escolha correta dos parâmetros é fundamental para o funcionamento do controlador. Um conjunto inadequado de parâmetros pode levar a uma piora do comportamento, ou até mesmo causar a perda da estabilidade.

4.6 Testes em Malha Fechada

Adotando-se os valores dos ganhos proporcional (Kp), integral (Ki) e derivativo (Kd) calculados pela metodologia proposta por Ziegler-Nichols e, posteriormente submetidos a um ajuste fino manual, realizou-se uma série de testes visando o estudo do comportamento do sistema de controle da rotação do eixo do dosador em função de diversos sinais de excitação.

4.6.1 Excitação do tipo degrau

Adotando-se os parâmetros anteriormente determinados para Kp , Ki e Kd , e aplicando um sinal de teste do tipo degrau, como mostrado na Figura 31, obteve-se um comportamento da rotação do eixo como mostrado na Figura 83.

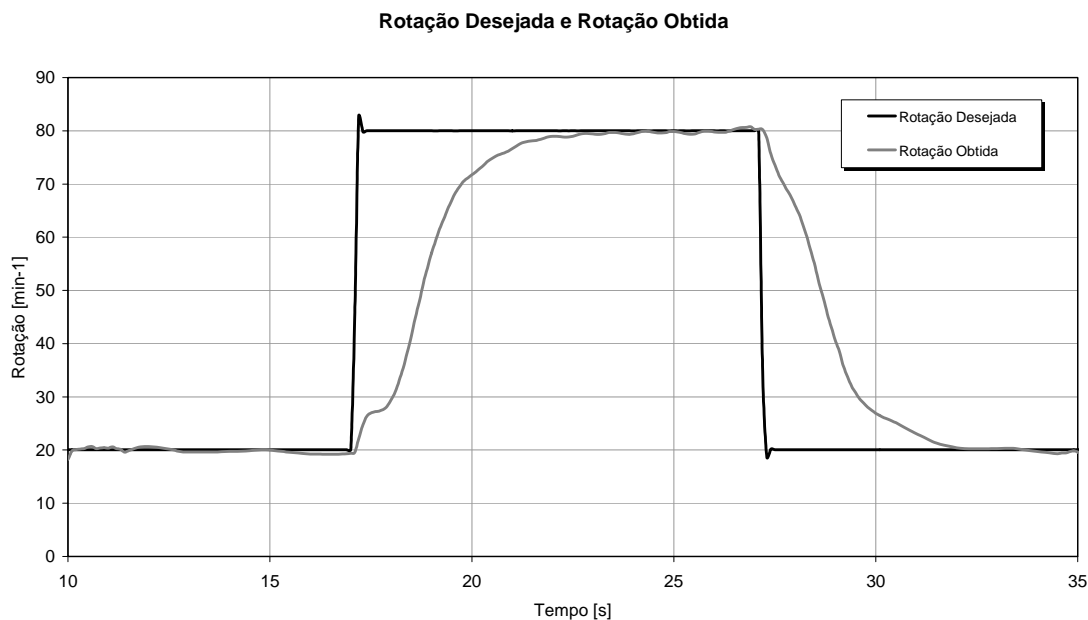


Figura 83 – Comportamento da rotação do motor, para um sinal de excitação do tipo degrau, com o controlador PID submetido a um ajuste fino

Comparando-se os resultados do comportamento da rotação do motor para o sistema em malha fechada com os resultados com o sistema em malha aberta (Figura 63), observa-se a eliminação do fenômeno da histerese. Porém, pode-se notar que o sistema torna-se mais lento, demorando um tempo maior para atingir a rotação desejada. O sistema em malha fechada demorou aproximadamente 4 segundos para que a rotação do motor se elevasse do nível de 20 min^{-1} e atingisse o nível de 80 min^{-1} . Para o sistema em malha aberta foi necessário tempo de aproximadamente 1,2 segundos para que a rotação do motor elevasse do nível de 10 min^{-1} e atingisse o nível de 70 min^{-1} .

Nota-se que em um intervalo de 4 segundos a rotação excursiona de 20 % a 80 % do valor máximo e que em situações reais de operação não deverão existir alterações bruscas tão elevadas na rotação.

4.6.2 Excitação do tipo degraus múltiplos

Aplicando um sinal de teste do tipo degraus múltiplos, como mostrado na Figura 33, porém limitando-se a rotação desejada no valor mínimo de 10 min^{-1} e o valor máximo em 90 min^{-1} , obteve-se um comportamento da rotação do eixo como mostrado na Figura 84.

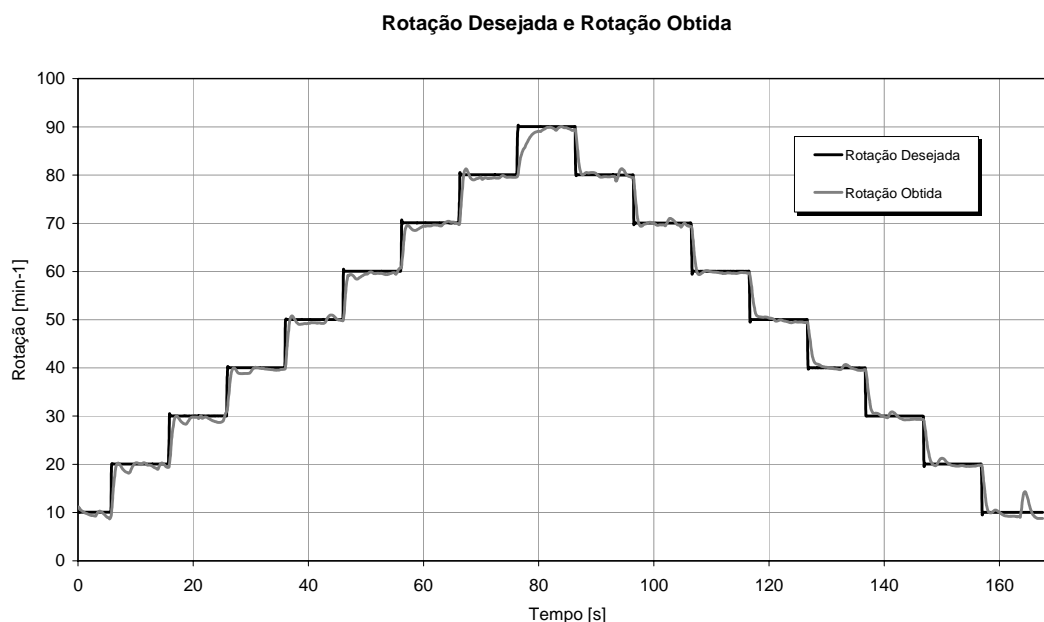


Figura 84 – Comportamento da rotação do motor, para um sinal de excitação do tipo degraus múltiplos, com o controlador PID submetido a um ajuste fino

Comparando-se com o comportamento do sistema em malha aberta (Figura 65) observa-se um ganho expressivo do sistema em malha fechada com um controlador PID submetido a um ajuste fino.

Quando compara-se o comportamento do sistema com o controlador PID submetido a um ajuste fino, com o controlador PID obtido da metodologia de Ziegler-Nichols, observa-se uma melhora em todas as especificações de desempenho. O controlador PID submetido a um ajuste fino, proporcionou um desempenho bastante satisfatório, atendendo aos requisitos do projeto, sendo então adotado como controlador da rotação dos motores hidráulicos.

Nota-se também que, na transição do regime de rotação de 80 min^{-1} para 90 min^{-1} , houve um aumento do tempo de atraso, em relação aos demais regimes de rotação. Esse fenômeno é justificado pelo fato de que, para se manter um regime elevado de rotação é necessário uma vazão elevada de óleo. Isto faz com que as válvulas operem praticamente no limite máximo de abertura, causando uma resposta mais lenta.

4.6.3 Excitação do tipo rampa rápida

Adotando-se os parâmetros anteriormente ajustados para K_p , K_i e K_d , e aplicando um sinal de teste do tipo rampa rápida, como mostrado na Figura 35, porém limitando-se a rotação desejada no valor mínimo de 10 min^{-1} e o valor máximo em 90 min^{-1} , obteve-se um comportamento da rotação do eixo como mostrado na Figura 85.

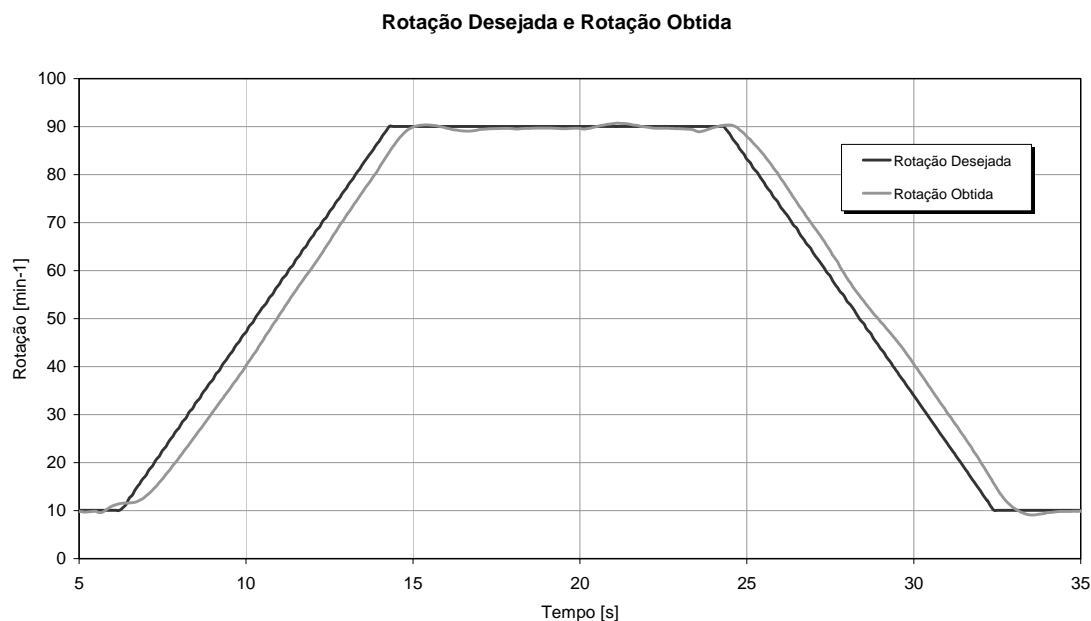


Figura 85 – Comportamento da rotação do motor, para um sinal de excitação do tipo rampa rápida, com o controlador PID submetido a um ajuste fino

Comparando se os resultados do comportamento da rotação do motor para o sistema em malha aberta (Figura 67) com o sistema em malha fechada observa-se uma melhora

significativa no comportamento do sistema em malha fechada. O tempo de atraso foi significativamente reduzido, como também o erro em regime. Mesmo com o uso de um controlador PID, é praticamente impossível a eliminação desse tempo de atraso, pois o mesmo é decorrente de inércias mecânicas presentes no sistema. Outro fato a ser considerado é que em uma operação real, raramente o equipamento será submetido a alterações de dosagem a uma taxa tão elevada quanto à utilizada nestes testes.

4.6.4 Excitação do tipo rampa lenta

Aplicando um sinal de teste do tipo rampa lenta, como mostrado na Figura 27, porém limitando-se a rotação desejada no valor mínimo de 10 min^{-1} e o valor máximo em 90 min^{-1} , obteve-se um comportamento da rotação do eixo como mostrado na Figura 86.

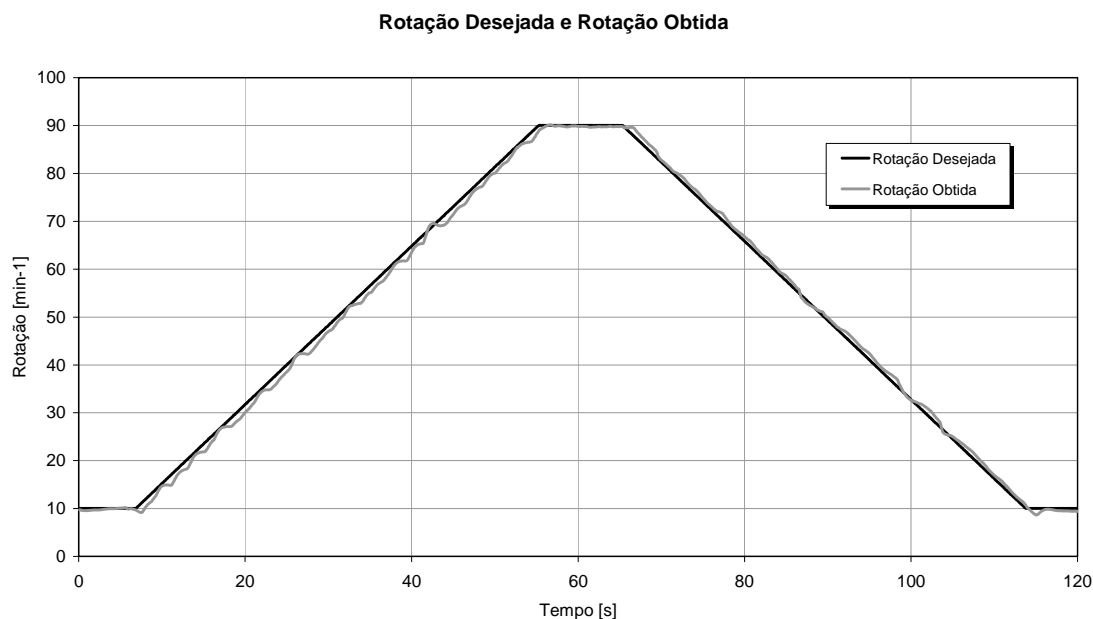


Figura 86 – Comportamento da rotação do motor, para um sinal de excitação tipo rampa lenta, com o controlador PID submetido a um ajuste fino

Analisando-se os resultados do teste do tipo rampa lenta para o controlador PID submetido a um ajuste fino, verifica-se uma grande melhora no comportamento do sistema em

relação do sistema em malha aberta (Figura 69). Para este tipo de sinal de teste, o atraso existente foi praticamente zerado. Praticamente não existe erro entre a rotação desejada e a rotação obtida, provando que o controlador foi eficiente, pois eliminou os atrasos e o efeito da histerese presentes no sistema.

4.6.5 Excitação do tipo rampas múltiplas

Aplicando um sinal de teste do tipo rampa lenta, como mostrado na Figura 39, porém limitando-se a rotação desejada no valor mínimo de 10 min^{-1} e o valor máximo em 90 min^{-1} , obteve-se um comportamento da rotação do eixo como mostrado na Figura 87.

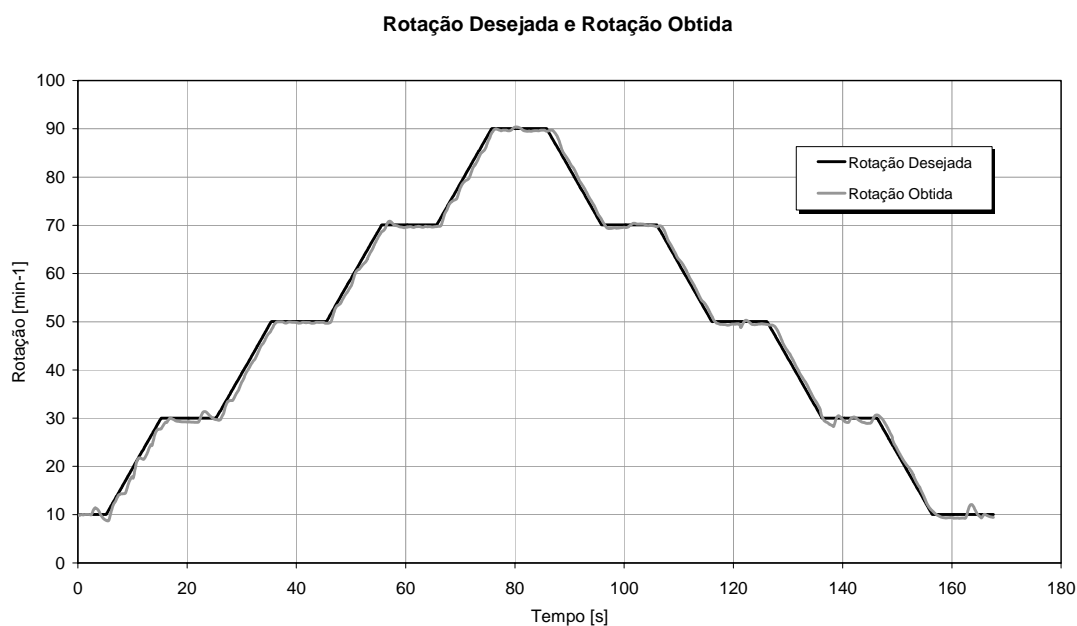


Figura 87 – Comportamento da rotação do motor, para um sinal de excitação tipo rampas múltiplas, com o controlador PID submetido a um ajuste fino

Comparando-se os resultados do comportamento da rotação do motor para o sistema em malha aberta (Figura 71) com o sistema em malha fechada, novamente se observa uma melhora significativa no comportamento do sistema em malha fechada.

A rotação de saída é praticamente igual à rotação desejada, com a ausência do fenômeno da histerese. Esse resultado é bastante importante, pois esse sinal de teste é o que mais se assemelha a uma situação real. Uma característica observada no comportamento do sistema em malha fechada, com o controlador PID ajustado, é a presença de pequenas oscilações na rotação, principalmente quando o sistema opera em um regime de rotações reduzidas.

4.6.6 Comportamento do sistema em função do aquecimento do óleo

Com a introdução de um controlador de rotação repetiu-se os testes dinâmicos para avaliação do comportamento do sistema em função do aquecimento do óleo hidráulico. Novamente foram realizados dois experimentos utilizando-se um sinal de teste do tipo degraus múltiplos. O primeiro deles foi realizado com o óleo hidráulico a uma temperatura de 24 °C e o segundo com o óleo aquecido a uma temperatura de 75 °C. Os resultados dos dois testes estão apresentados na Figura 88.

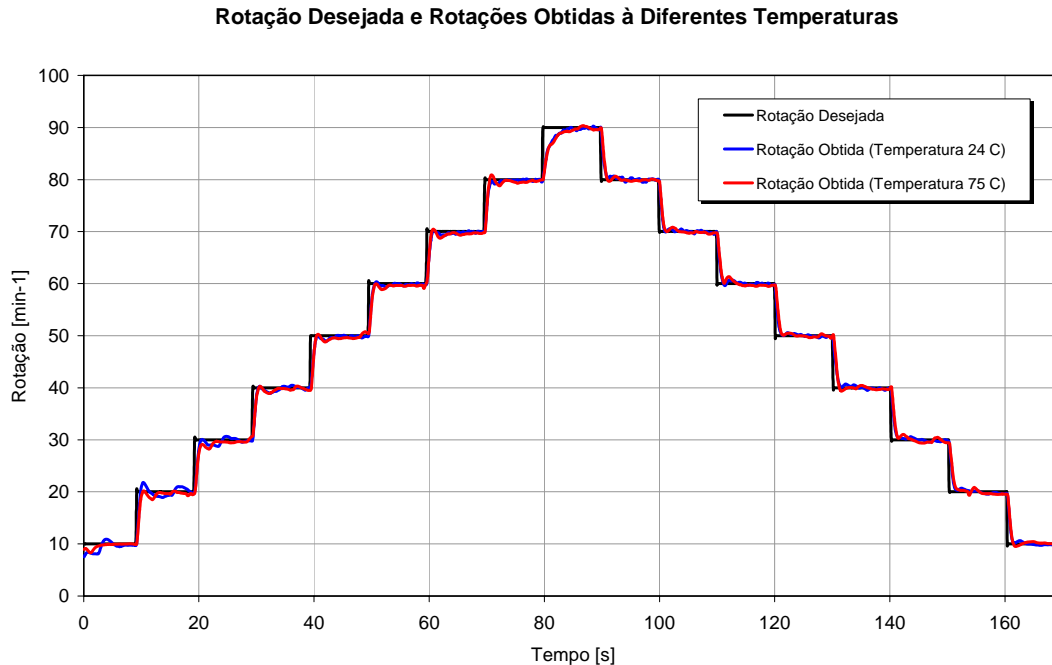


Figura 88 – Rotação desejada e rotação obtida à diferentes temperaturas, para um sinal de excitação tipo degraus múltiplos, com o controlador PID submetido a um ajuste fino

Comparando-se os resultado do sistema em malha fechada com os do sistema em malha aberta, mostrado na Figura 73, nota-se que, para o sistema operando em malha fechada, as rotações se mantêm inalteradas mesmo com a alteração na temperatura do óleo hidráulico. Esse resultado é muito importante, pois elimina qualquer tipo de preocupação na manutenção de uma temperatura constante do óleo hidráulico para que se possa garantir um perfeito funcionamento do sistema. Destaca-se o fato de que o óleo hidráulico deve ser mantido dentro dos limites operacionais dos componentes hidráulicos do sistema, evitando problemas de superaquecimento e perda das características funcionais do mesmo. Nota-se também que, na transição do regime de rotação de 80 min^{-1} para 90 min^{-1} , houve um aumento do tempo de atraso, em relação aos demais regimes de rotação. Esse fenômeno é justificado pelo fato de que, para se manter um regime elevado de rotação é necessário uma vazão elevada de óleo. Isto faz com que as válvulas operem praticamente no limite máximo de abertura, causando uma resposta mais lenta.

4.6.7 Flutuação na rotação da bomba

Com o objetivo de se avaliar uma possível influência da rotação da bomba sobre a rotação do motor, realizou-se uma série de quatro testes onde o sinal de comando foi mantido em um nível constante enquanto variou-se, significativamente, a rotação da bomba. A Figura 75 mostra curva de flutuação na rotação da bomba hidráulica utilizada nos testes.

Rotação desejada de 20 min^{-1}

Neste teste, o sistema operou em malha fechada, com os parâmetros do PID devidamente ajustado, e a rotação de comando foi mantida em 20 min^{-1} . Nota-se pelo comportamento observado na Figura 89, que a rotação do eixo não sofreu uma queda de rotação quando a bomba operou na menor rotação. Esse comportamento indica que o controlador conseguiu manter uma rotação constante no eixo do motor, mesmo na ocorrência de uma diminuição do fluxo de óleo hidráulico.

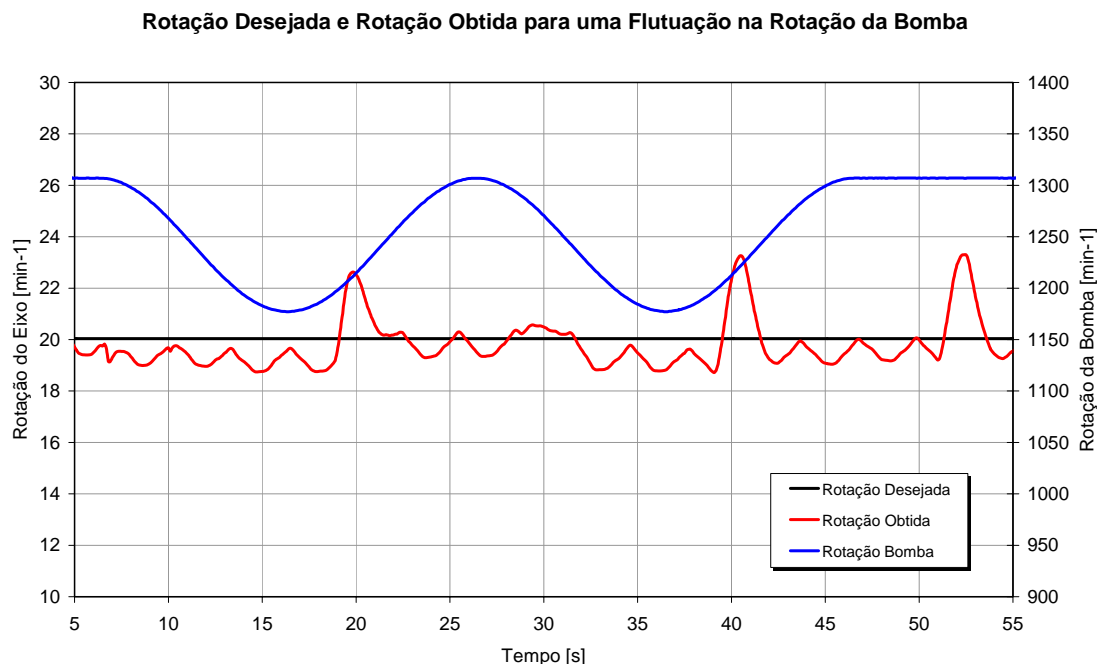


Figura 89 – Rotação desejada e rotação obtida em função de uma flutuação na rotação da bomba, para a rotação desejada de 20 min^{-1}

Como desvantagem da utilização do controlador pode-se verificar a ocorrência de uma ligeira oscilação na rotação do eixo do motor, que foi de aproximadamente 4 min^{-1} na pior situação analisada, mantendo, na maior parte do tempo uma oscilação de aproximadamente 1 min^{-1} .

Rotação desejada de 40 min^{-1}

Para esse teste o valor da rotação desejada foi mantido em 40 min^{-1} enquanto a rotação da bomba era submetida a uma flutuação. Nota-se pelo comportamento observado na Figura 90, que a rotação do eixo quase não sofreu influência em sua rotação quando a bomba foi submetida a uma flutuação de rotação. Esse comportamento indica que o controlador conseguiu manter uma rotação constante no eixo do motor, mesmo na ocorrência de uma diminuição do fluxo de óleo hidráulico.

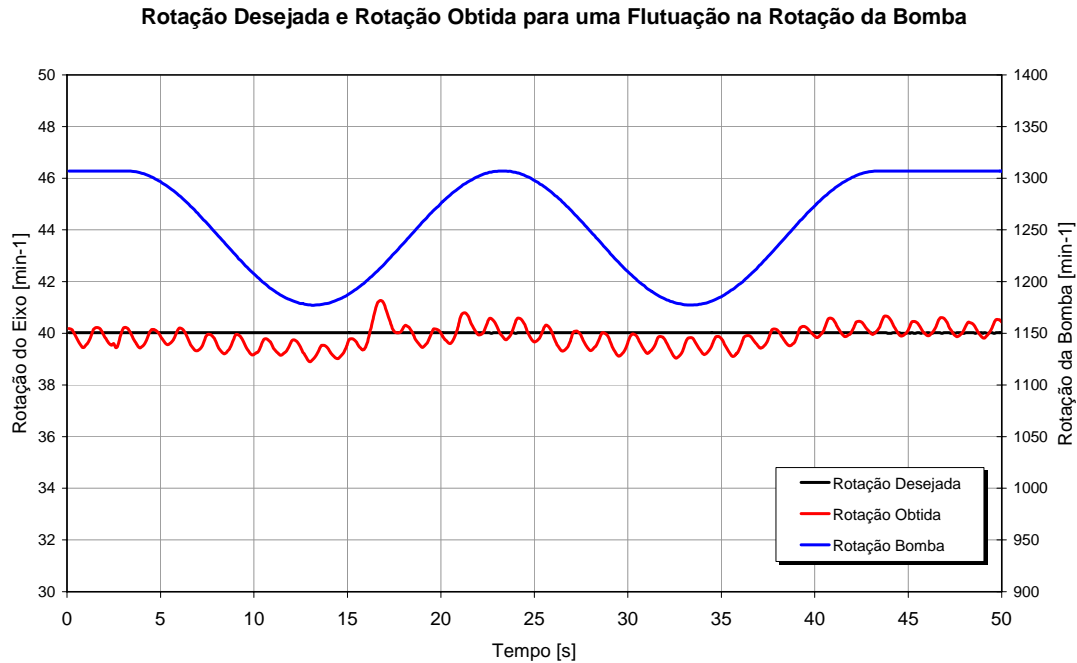


Figura 90 – Rotação desejada e rotação obtida em função de uma flutuação na rotação da bomba, para a rotação desejada de 40 min^{-1}

Como desvantagem da utilização do controlador pode-se verificar a ocorrência de uma ligeira oscilação na rotação do eixo do motor, que na situação analisada foi de aproximadamente 2 min^{-1} .

Rotação desejada de 60 min^{-1}

Para esse teste o valor da rotação desejada foi mantido em 60 min^{-1} enquanto a rotação da bomba era submetida a uma flutuação. Novamente nota-se pelo comportamento observado na Figura 91, que a rotação do eixo não sofreu influência em sua rotação quando a bomba foi submetida a uma flutuação de rotação. Esse comportamento indica que o controlador conseguiu manter uma rotação constante no eixo do motor, mesmo na ocorrência de uma diminuição do fluxo de óleo hidráulico.

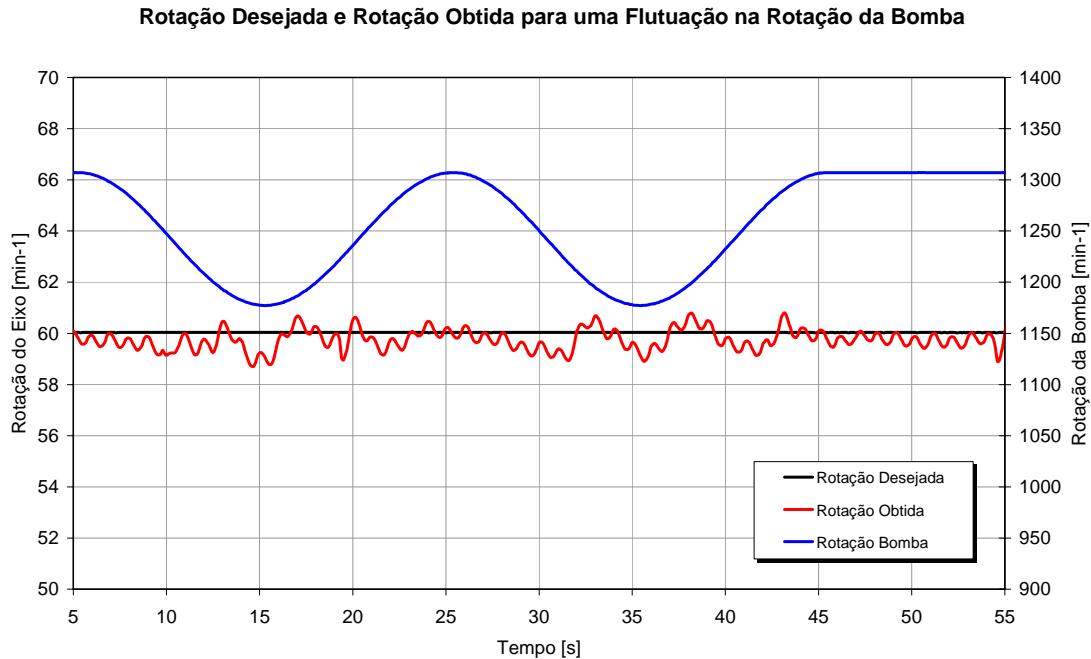


Figura 91 – Rotacão desejada e rotacão obtida em funçao de uma flutuaçao na rotacão da bomba, para a rotacão desejada de 60 min⁻¹

Mais uma vez como desvantagem da utilizacão do controlador pode-se verificar a ocorrencia de uma ligeira oscilaçao na rotacão do eixo do motor, que na situacão analisada foi de aproximadamente 2 min⁻¹.

Rotacão desejada de 80 min⁻¹

Para esse teste o valor da rotacão desejada foi mantido em 80 min⁻¹ enquanto a rotacão da bomba era submetida a uma flutuaçao. Novamente nota-se pelo comportamento observado na Figura 92, que a rotacão do eixo não sofreu influencia em sua rotacão quando a bomba foi submetida a uma flutuaçao de rotacão. Esse comportamento indica que o controlador conseguiu manter uma rotacão constante no eixo do motor, mesmo na ocorrencia de uma diminuicão do fluxo de óleo hidráulico.

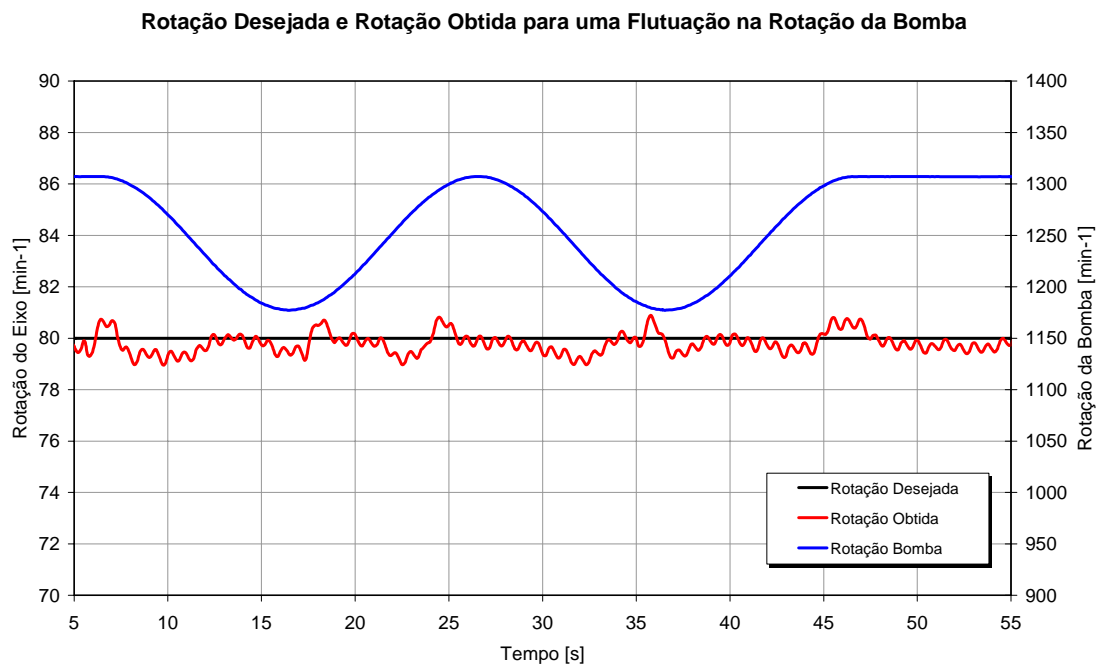


Figura 92 – Rotação desejada e rotação obtida em função de uma flutuação na rotação da bomba, para a rotação desejada de 80 min^{-1}

Mais uma vez como desvantagem da utilização do controlador pode-se verificar a ocorrência de uma ligeira oscilação na rotação do eixo do motor, que na situação analisada foi de aproximadamente 2 min^{-1} .

Os resultados demonstraram que com a introdução do controlador no sistema, a rotação do motor não mais sofreu influência da flutuação da rotação da bomba.

5. CONCLUSÕES

Ao final deste trabalho pode-se concluir que:

- Os testes iniciais mostraram uma boa correlação e linearidade entre a tensão de comando e a rotação dos motores hidráulicos. Porém, verificou-se a existência de problemas devido à ocorrência de histerese e alteração no comportamento da rotação com o aquecimento do óleo hidráulico. Esses fenômenos prejudicaram o desempenho do controle de rotação dos motores em malha aberta. Outros resultados importantes foram os comportamentos semelhantes entre os três motores e a não interdependência entre eles.
- A metodologia empregada para avaliação do equipamento se mostrou adequada. Os sinais de excitação utilizados nos testes conseguiram reproduzir situações que simulam uma operação real do equipamento, ou mesmo solicitações ainda mais severas que as reais. O sistema de aquisição de dados e processamento de sinais se mostrou apropriado, permitindo o registro das grandezas de interesse de uma forma automatizada.
- Os aplicativos computacionais desenvolvidos se mostraram suficientes para o controle geral do equipamento. O ambiente de desenvolvimento LabVIEW é uma ferramenta bastante poderosa, permitindo o desenvolvimento de aplicativos computacionais de maneira rápida e intuitiva.
- O uso de um ambiente gráfico mostrou ser uma solução bastante interessante para o desenvolvimento de sistemas de controle aplicados a máquinas e equipamentos agrícolas. Sua grande vantagem é a facilidade de programação e

implementação de interfaces gráficas com o usuário. Com o crescente nível de sofisticação dos equipamentos agrícolas é praticamente indispensável a utilização de aplicativos que possibilitem a implementação de tais interfaces.

- Os controladores do tipo PID implementados em LabVIEW se mostraram bastante eficazes e versáteis. A metodologia de Ziegler-Nichols se mostrou válida para uma estimativa inicial dos parâmetros dos controladores. Após um procedimento de sintonia fina, observou-se uma expressiva melhora nos índices de desempenho analisados. Com os controladores PID eliminou-se os problemas de histerese e dos problemas decorrentes do aquecimento do óleo hidráulico.
- Os testes realizados mostraram que o sistema de controle implementado foi adequado para utilização no protótipo do equipamento para formulação, dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis.
- O protótipo do equipamento para formulação, dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis apresenta um novo conceito referente à correção da variabilidade espacial de cada macronutriente no solo.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante sua realização deparou-se com obstáculos de ordem técnica que permitem sugerir os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Realização de testes em campo onde será avaliado o aplicativo computacional para o controle do equipamento, mais especificamente no que diz respeito a sua integração com o GPS.
- Implementação do sistema de controle do equipamento em uma plataforma baseada em microcontroladores, dispensando o uso de uma plataforma computacional tradicional e visando a redução do custo final do sistema e futura implementação de uma versão comercial.
- Desenvolvimento de uma plataforma, que englobe, além do sistema de controle do equipamento, um sistema de posicionamento global com correção diferencial, em tempo real e de baixo custo.
- Desenvolvimento de uma rotina para que, a partir da direção, sentido e velocidade de deslocamento do equipamento, sejam antecipadas as ações para mudanças de formulação contidas nos mapas de aplicação, visando uma diminuição do tempo de resposta do equipamento.

- Substituição da bomba hidráulica de engrenagens por uma bomba do tipo “*load sense*”, otimizando dessa forma a eficiência energética do sistema hidráulico de acionamento dos motores.
- Desenvolver um aplicativo computacional para escolha otimizada dos três pré-formulados comerciais a serem utilizados no equipamento, utilizando-se técnicas de Pesquisa Operacional, tais como: Programação Multi-Objetivo, Programação Linear, Programação Não Linear e Otimização Combinatória.
- Desenvolvimento de um aplicativo computacional que possibilite a geração de mapas de aplicação para cada um dos pré-formulados comerciais a serem utilizados no equipamento, a partir da variabilidade espacial de cada macronutriente no solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUERNHAMMER, H. Precision farming – the environmental challenge. **Computers and Electronics in Agriculture**. v. 30, p. 31–43, 2001.

BALASTREIRE, L. A. Aplicação localizada de insumos – ALI: Um velho conceito novo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 23. **Resumo dos anais**, Campinas: UNICAMP, p.248, 1994.

BALASTREIRE, L. A. A experiência com pesquisa em agricultura de precisão na ESALQ / USP, In GIS BRASIL, 1998. Curitiba.

BOLTON, W. **Engenharia de controle**. São Paulo: Makron Books, 1995. 497p.

BRASIL EM SÍNTESE – Agropecuária. In: IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Base de dados**. 2003. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: 10 de set. 2003.

CAPPELLI, N. L. Agricultura de Precisão - Novas tecnologias para o processo produtivo. **GIP – Agricultura de Precisão**, Campinas, 1997. **Boletim Eletrônico...** Disponível em: <<http://www.bases.cnptia.embrapa.br/cria/gip/gipap/capelli.htm>>. Acesso em: 08 set. 2003.

COX, S. Information technology: the global key to precision agriculture and sustainability. **Computers and Electronics in Agriculture**. v.36, n.2-3, p.93-111, nov./2002.

DANNA, P. H. Global Positioning System Overview. **The Geographer's Craft Project**. Texas, 2000. Disponível em <<http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps.html>>. Acesso em: 08 set. 2003.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de controle modernos**. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001. 659p.

ELIAS, A. I. **Mapeamento da colheita mecanizada de grãos utilizando um sistema de posicionamento global**. Piracicaba, 1998. 75p. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – USP, Piracicaba, 1998.

ESTATÍSTICAS – Principais Indicadores do Setor. In: ANDA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Planilha**. 2003. Disponível em: <<http://www.anda.org.br>>. Acessado em 10 de set. de 2003.

FRAISSE, C., FAORO, L. Agricultura de Precisão: A Tecnologia de GIS/GPS Chega às Fazendas. **Revista Fator GIS On Line**. Curitiba, 1998. Artigos.

GORGULHO, M. Apostila de GPS – O Sistema de Posicionamento Global. **GPS TrackMaker**. 2001. Disponível em: <http://gpstm.com/port/apostila_port.htm>. Acesso em 08 set. 2003.

KUO, B. C. **Automatic Control Systems**. 7.ed. Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1995. 897p.

LECHNER, W., BAUMANN, S. Global navigation satellite systems. **Computer and Electronics in Agriculture**. v. 25, n.1-2, p. 67-85, jan./2000.

MAOHUA, W. Possible adoption of precision agriculture for developing countries at the threshold of the new millennium. **Computers and Electronics in Agriculture**. v.30, n.1-3, p.45-50, fev./2001.

MARTINS, M. M. **Desenvolvimento de um dosador helicoidal visando sua utilização em equipamentos de aplicação localizada de fertilizantes sólidos**. 1999. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP, Campinas. 1999.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: Descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora Unesp, 2000. 287p.

MORGAN, M.; ESS, D. **The precision-farming guide for agriculturists**. Illinois: John Deere Publishing, 1997. 115p.

OGATA, K. **Modern control engineering**. 2.ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1990. 963p.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4.ed. São Paulo: Prentice Hall do Brasil, 2003. 788p.

OLIVA, R. A. G.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. Máquina para aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis – Adaptação de um modelo comercial convencional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 30, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2001. 1CD.

REICHARDT, K. Variabilidade espacial (e temporal) de solos. In: **Processos de Transferência no Sistema Solo-Planta-Atmosfera**. Campinas: Fundação Cargil, 1985. p.391-416.

ROCHA, J. A. M. R. **GPS: Uma abordagem prática**. 3.ed. Recife: Ed. Bagaço Ltda, 2002. 184p.

SARAIVA, A. M.; CUGNASCA; C. E.; PAZ, S. M. O problema da padronização e integração de sistemas na Agricultura de Precisão. In: GIS BRASIL, 1998. Curitiba. **Mostra Especial...**

SANTOS, M. C. O alcance do RTK. **Revista MundoGeo**. v.24, jul./2002. Disponível em: <<http://www.mundogeo.com.br>>. Acesso em: 20 mai. 2003.

SCARLETT, A. J. Integrated control of agricultural tractors and implements: a review of potential opportunities relating to cultivation and crop establishment machinery. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.30, n.1-3, p.167-191, fev./2001.

SUDDUTH, K. A. Engineering Technologies for Precision Farming. In: INTERNATIONAL SEMINAR ON AGRICULTURAL MECHANIZATION TECHNOLOGY FOR PRECISION FARMING, 1999, Suwon. **Anais...**1999.

STAFFORD, J. V.; AMBLER, B; LARK, R M; CATT, J. Mapping and interpreting the yield variation in cereal crops. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.14, n.2-3, p.101-119, fev./1996.

STAFFORD, J. V. Spatially variable field operations. **Computers and Electronics in Agriculture**. v.14, n.2-3, p.99-100, fev./1996a.

STAFFORD, J. V. Essential technology for precision agriculture. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 1996, Minneapolis. **Proceedings...** 1996. Madison: ASA – CSSA – SSSA, 1996b. p.595-604.

SWINTON, S. M.; LOWENBERG-DEBOER, J. Global Adoption of Precision Agriculture Technologies: Who, When and Why? In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 2001, Montpellier: Agro Montpellier (ENSAM),2001. p.557-562.

VESETH, R; Variable Fertilizer Application Improves Profits and Conservation. **Pacific Northwest Conservation Farming Handbook**. Washington DC : Washington State University, 2001. cap.6. Disponível em: <<http://pnwsteep.wsu.edu/tillagehandbook/>>. Acessado em: 08 set. 2003.

WHELAN, B. M.; McBRATNEY, A. B.; BOYDELL, B. C. The Impact of Precision Agriculture. In: ABARE OUTLOOK CONFERENCE “THE FUTURE OF CROPPING IN NW NSW”, **Proceedings...** Moree, UK, 1997, p. 5.

ZHANG, N; WANG, M.; WANG, N. Precision agriculture – a worldwide overview. **Computers and Electronics in Agriculture**. v.36, n. 2-3, p.113-132, nov. 2002.